



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

ULB

# Analyse und Prognose von Straßenzustandsdaten mit Hilfe von probabilistischen Methoden und der Strukturgleichungsmodellierung

Blumenfeld, Tim Jonas  
(2020)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00013279>

Lizenz:



CC-BY-NC-SA 4.0 International - Creative Commons, Attribution Non-commercial, Share-alike

Publikationstyp: Ph.D. Thesis

Fachbereich: 13 Department of Civil and Environmental Engineering Sciences

Quelle des Originals: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/13279>

---

# **Analyse und Prognose von Straßenzustandsdaten mit Hilfe von probabilistischen Methoden und der Strukturgleichungsmodellierung**

**Analysis and Prediction of Road Condition Data  
by Using Probabilistic Approaches and Structural Equation Models**

Zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation von Tim Jonas Blumenfeld, M.Sc. aus Wiesbaden  
Tag der Einreichung: 21.04.2020  
Tag der mündlichen Prüfung: 27.07.2020  
Darmstadt – D17

Referent: Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Markus Stöckner



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



---

Blumenfeld, Tim:

Analyse und Prognose von Straßenzustandsdaten  
mit Hilfe von probabilistischen Methoden und der Strukturgleichungsmodellierung  
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2020

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-132796

URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/13279>

Veröffentlicht unter CC BY-NC-SA 4.0 International

Tag der mündlichen Prüfung: 27.07.2020

---

# **Analyse und Prognose von Straßenzustandsdaten mit Hilfe von probabilistischen Methoden und der Strukturgleichungsmodellierung**

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte  
DISSERTATION

vorgelegt von  
**Tim Jonas Blumenfeld, M.Sc.**  
aus Wiesbaden

Referent: Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald  
Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn  
Prof. Dr.-Ing. Markus Stöckner

Datum der Einreichung: 21.04.2020  
Datum der Prüfung: 27.07.2020

Darmstadt 2020

**D17**



---

## Vorwort

---

Die Idee zur Anfertigung der vorliegenden Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Straßenwesen an der Technischen Universität Darmstadt. Durch die Bearbeitung zahlreicher Forschungsaufträge sowie der Teilnahme an wissenschaftlichen Diskussionen im Rahmen von Gremien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) konnte ich mein Interesse für das wissenschaftliche Arbeiten intensivieren.

An dieser Stelle gilt mein besonderer Dank dem Leiter des Instituts für Straßenwesen, Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald, der mir die Möglichkeit gab, diese Arbeit zu verfassen und mich auf diesem Weg sehr unterstützt hat.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn für die Übernahme des Korreferats danken. Der fachliche Austausch mit ihm zu verwandten Fragestellungen aus dem Bereich der Geodäsie gab mir wertvolle Anregungen für den Fortschritt dieser Arbeit.

Dem Leiter des FGSV-Arbeitsausschusses „Management der Straßenerhaltung“ Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Stöckner danke ich ebenfalls für die Übernahme des Korreferats. Er half mir dabei, die Arbeit in den Gesamtkontext des Erhaltungsmanagements einzuordnen und stand mir für Rückfragen gerne zur Verfügung.

Ich danke weiterhin dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), der Hessischen Straßenbauverwaltung (Hessen Mobil) sowie der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) für die Bereitstellung der Daten der ZEB-Dauermessstrecke. Hierbei gilt mein Dank insbesondere Frau Dr.-Ing. Ulrike Stöckert, die mich über den gesamten Zeitraum gefördert hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen des Instituts für Straßenwesen an der TU Darmstadt für die fachlichen Diskussionsrunden, die Unterstützung insbesondere gegen Ende der Arbeit, die angenehme Arbeitsatmosphäre und den kollegialen Zusammenhalt.

Mein besonderer Dank gilt außerdem Lea, die mich stets unterstützt hat und mir nicht nur bei statistischen Fragestellungen mit kompetenten Ratschlägen zur Seite stand.

Wiesbaden, im April 2020



---

## Kurzfassung

---

Eine leistungsfähige und sichere Verkehrsinfrastruktur ist die Grundvoraussetzung für gesellschaftlichen Fortschritt. Sie ermöglicht Wirtschaftswachstum, Beschäftigung und Wohlstand und stellt damit das Rückgrat einer modernen Gesellschaft dar. Planung, Bau, Betrieb und Erhaltung von Straßenverkehrswegen erfordern einen bedeutenden Einsatz sowohl an wirtschaftlichen als auch an personellen Ressourcen. Der Bundesverkehrswegeplan 2030 sieht ein Gesamtinvestitionsvolumen von etwa 270 Mrd. Euro vor. Ein Finanzvolumen von ca. 133 Mrd. Euro ist für Bauprojekte von Bundesfernstraßen vorgesehen, wovon wiederum etwa 70 Mrd. Euro für die Erhaltung dieser Straßenbauwerke angesetzt sind [BMVI 2016].

Für eine zielgerichtete und nach objektiven Kriterien ermittelte Verteilung der Finanzmittel kommt in Deutschland ein Pavement Management System (PMS) zum Einsatz, das auf Basis des aktuellen Zustands des Netzes und dessen zukünftiger Entwicklung den Erhaltungsbedarf der Bundesfernstraßen abschätzt. Dazu werden moderne Methoden sowie ein fundiertes Fachwissen benötigt. Abschätzungen zum zeitlichen Zustandsverlauf von Fahrbahnbefestigungen stellen innerhalb des PMS einen wesentlichen Baustein dar, um anhand dessen den abschnittsbezogenen Erhaltungsbedarf abzuschätzen. Dabei werden einzelne Auswerteabschnitte zunächst zu längeren homogenen Abschnitten zusammengefasst. Anschließend wird auf Basis des zuletzt erfassten und normierten Zustandes sowie der Liegezeit eine abschnittsbezogene Verhaltensfunktion ermittelt. Die Ergebnisse dieser bisher deterministisch durchgeführten Berechnungen stellen die Grundlage für den darauffolgenden Entscheidungsprozess dar. Die dabei naturgemäß vorzufindenden Unsicherheiten innerhalb dieses Planungs- und Entscheidungsprozesses sind auf verschiedene Ursachen, wie z. B. die Datenerfassung, die Datenpflege, das diverse Materialverhalten sowie die verkehrlichen und klimatischen Randbedingungen, zurückzuführen. Damit zukünftig eine risikobasierte Entscheidungsfindung erfolgen kann, bedarf es jedoch geeigneter Methoden, die anhand von Szenarien mögliche Ereignisse und deren zugehörige Eintrittswahrscheinlichkeiten quantifizieren können.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung und Validierung eines probabilistischen Prognosemodells, welches sowohl die Unsicherheiten bei der Zustandserfassung als auch bei der Abschätzung der Zustandsentwicklung berücksichtigt. Anhand einer Gegenüberstellung der ermittelten Prognoseergebnisse mit den Ergebnissen der bisher verwendeten deterministischen Verfahren soll die Anwendbarkeit des entwickelten Modells beurteilt werden. Die entwickelte Methode soll einen zukünftigen risikobasierten Entscheidungsprozess innerhalb des systematischen Erhaltungsmanagements ermöglichen.

Als Datengrundlage werden Daten der ZEB-Dauermessstrecke in Hessen verwendet. In Ergänzung zu der alle vier Jahre durchgeführten Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) erfolgt auf einem ca. 76 km langen Teilabschnitt der BAB A5 seit einigen Jahren eine halbjährliche Erfassung und Bewertung des Zustandes auf allen Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn. Neben den Zustandsdaten werden zusätzlich Daten zur Verkehrsbelastung, zum Aufbau und zu den klimatischen Bedingungen erhoben sowie sämtliche Maßnahmen der betrieblichen und baulichen Erhaltung detailliert dokumentiert.

Das Kernelement der entwickelten Methode basiert auf dem Ansatz der Bayes'schen Statistik. Der aufgezeigte Modellansatz (Kalman-Filter) differenziert zwischen dem wahren Zustand einer Fahrbahnoberfläche, dem gemessenen, mit Unsicherheit behafteten Zustand in Form von Beobachtungen im Rahmen der ZEB sowie einem mit Hilfe eines Modells geschätzten Systemzustands zu jeweils diskreten

---

Zeitpunkten. Durch die Kombination aus einem a priori festgelegten Systemverhalten und dem kontinuierlichen Abgleich zwischen erwarteten und gemessenen Zuständen wird auf den wahren Zustandsverlauf eines Auswerteabschnittes zurückgeschlossen. Die Methode bietet die Möglichkeit einer probabilistischen Analyse und Prognose des Straßenzustands, um die große Variation von möglichen Zustandsentwicklungen treffend abzubilden.

Die entwickelte Methode wird exemplarisch am Beispiel des Zustandsmerkmals Ebenheit im Querprofil für Fahrbahnen in Asphaltbauweise angewendet. Da die Zustandsentwicklung einer Fahrbahnoberfläche einer Vielzahl an Einflussgrößen unterliegt, sind hierbei erhebliche Streuungen zu beobachten, die eine treffende Zustandsprognose erschweren. Um die Unsicherheiten in der Prognose zu reduzieren, werden zusätzliche Informationen in das Modell integriert. Dazu werden zunächst potentielle Einflussfaktoren identifiziert und die daraus entwickelten Hypothesen einer statistischen Prüfung unterzogen. Dies erfolgt mit Hilfe eines Wachstumskurvenmodells, welches um den Prädiktor Verkehrsbelastung erweitert wird. Abschließend werden die Ergebnisse des in dieser Arbeit entwickelten probabilistischen Prognosemodells mit den Ergebnissen der bisher verwendeten deterministischen Prognoseverfahren gegenübergestellt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass durch die Aufbereitung der Zustandsdaten mit Hilfe eines Kalman-Filters eine verbesserte Abschätzung der Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren erfolgen kann. Im Vergleich zu den nicht aufbereiteten Zustandsdaten kann die Abweichung zwischen wahren und prognostiziertem Mittelwert von 1,0 mm ( $SD = 1,2$  mm) auf 0,1 mm ( $SD = 1,5$  mm) verringert werden.

Neben einer verbesserten Prognose ermöglicht eine Aufbereitung der Daten eine deutliche Vergrößerung der für die probabilistische Beschreibung von Zustandsänderungen verwendeten Datengrundlage. Nach der Datenaufbereitung weisen nur noch etwa 5 % aller Auswerteabschnitte eine Zustandsverbesserung auf, wohingegen bei nicht aufbereiteten Daten ca. 50 % der Datengrundlage aufgrund von gemessenen Zustandsverbesserungen verworfen werden müsste. Durch die vergrößerte Datengrundlage können die Übergangsverteilungen innerhalb der Matrix wesentlich besser modelliert werden. Anhand einer weiteren Differenzierung der Zustandsänderungen nach der Verkehrsbelastung können die Zustandsverteilungen sowie die über alle Auswerteabschnitte zusammengesetzte Zustandsverteilung mit hoher Genauigkeit vorhergesagt werden.

Die Zustandsverteilung der mittleren Spurrinnentiefe auf dem Hauptfahrbahnenstreifen nach einer Liegezeit von 20 Jahren weist eine ausgeprägte Streuung auf, wohingegen auf dem ersten und zweiten Überholstreifen eine deutlich geringere Zustandsvariation zu beobachten ist. Die Abweichung des Mittelwertes über alle Auswerteabschnitte zwischen wahrer und prognostizierter Zustandsverteilung beträgt hierbei 0,0 mm. Die zugehörige Standardabweichung der prognostizierten Zustände ( $SD = 2,6$  mm) sowie die Standardabweichung der wahren Zustandsverteilung ( $SD = 3,2$  mm) zeigen jedoch auch, dass eine nicht mit Hilfe des entwickelten Modells erklärbare Reststreuung vorhanden ist.

Der Vergleich zwischen den deterministischen und dem probabilistischen Verfahren zeigt auf, dass das entwickelte Modell vergleichbare Prognoseergebnisse zu dem in den RPE-Stra 01 enthaltenen Verfahren der Koeffizientenanpassung liefert. Bei dem derzeit für Rechenläufe innerhalb des PMS verwendeten Curve-Shifting-Verfahren waren mit den Daten der ZEB-Dauermessstrecke die größten Abweichungen zwischen wahren und prognostizierten Zuständen zu beobachten.

---

Die vorliegende Arbeit liefert wichtige Erkenntnisse für die Zustandsprognose innerhalb des systematischen Erhaltungsmanagements von Straßen. Das probabilistische Modell ermöglicht eine Berücksichtigung der vorhandenen Unsicherheiten bei der Abschätzung der Restnutzungsdauer sowie bei der Planung von Erhaltungsmaßnahmen. Der Vergleich verschiedener Erhaltungsstrategien auf der Basis von Wahrscheinlichkeitsverteilungen bietet die Grundlage für eine risikobasierte Entscheidungsfindung. Dies stellt den wesentlichen Vorteil im Gegensatz zu den bisher verwendeten deterministischen Prognoseverfahren dar.

Die große Variabilität in der Zustandsentwicklung der mittleren Spurrinnentiefe auf dem Hauptfahrstreifen deutet daraufhin, dass wichtige Einflussfaktoren auf das zeitliche Verhalten einer Fahrbahnbefestigung derzeit nicht netzweit erfasst werden. Dazu zählen insbesondere Informationen zur strukturellen Substanz der Fahrbahnbefestigungen, die zum aktuellen Zeitpunkt (noch) nicht netzweit vorliegen. Dieser Ansatz wird in Zukunft fokussiert werden, da nur durch eine Berücksichtigung der strukturellen Substanz die Ursachen von Fahrbahnoberflächenschäden tiefergehend analysiert werden können. Eine Grundvoraussetzung hierfür ist die systematische Dokumentation und Pflege aller hiermit verbundenen Daten. Mit Hilfe dieser sehr wichtigen zusätzlichen Informationen kann die Zustandsprognose schließlich verfeinert werden.





---

## Abstract

---

Efficient and secure transport infrastructure is the fundamental prerequisite for social progress. It enables economic growth, employment, and prosperity and thus represents the backbone of modern society. Planning, construction, operation, and maintenance of roadways require significant use of both financial and human resources. The Federal Transport Infrastructure Plan 2030 provides for a total volume of about € 270 billion, of which about € 70 billion will be used to maintain the existing road network by 2030 [BMVI 2016].

In Germany, a Pavement Management System (PMS) is used for a purposeful and objective distribution of funds, which estimates the maintenance requirements of federal highways based on the current state of the network and its future development. For this purpose, modern evaluation methods, as well as sound expertise, are needed. Estimates of the temporal status of pavement fortifications represent an essential element within the PMS in order to estimate the section-related maintenance requirements. The results of these previously deterministic calculations provide the basis for the subsequent decision-making process. The inherent uncertainties within this planning and decision-making process are due to various causes, such as data collection, data maintenance, different material behavior, and traffic and climatic boundary conditions. For future risk-based decision-making, suitable methods are required that can quantify possible events and their associated probabilities of occurrence based on scenarios.

An accurate description of road deterioration is one of the most challenging aspects within the scope of Pavement Management Systems (PMS). However, the data quality is often insufficient, as research has shown a high amount of road sections with measured condition improvements based on a simple comparison of two condition monitoring campaigns. The reasons for these improvements are often unknown due to restricted data quality of recorded maintenance works. Concerning an asset of the current state of a road network, this aspect is not that relevant because measurement errors lead to condition improvements as well as to condition deteriorations. However, concerning a longitudinal analysis of road condition, a consequent exclusion of measured condition improvements leads to a systematic violation of type one and type two errors from a statistical point of view: Road sections whose condition truly got worse are excluded due to measured condition improvements. Even though the mentioned problem is already partially known, suitable methods to handle this issue hardly exist.

The aim of the present study is the development and validation of a probabilistic forecasting model, which takes both the uncertainties in the condition state detection and the estimation of the condition state development into account. Based on a comparison of the predicted condition states with the results of the previously used deterministic methods, the applicability of the developed model shall be assessed. The developed method should enable a future risk-based decision-making process within systematic pavement management.

This research is based on data from a long-term observation section in Hesse, Germany. In addition to the condition assessment and evaluation (ZEB), which is carried out every four years, semi-annual condition surveys on each driving lane have been carried out on the approx. 76 km long section of BAB A5 for several years. Furthermore, data on traffic loads, structure, and climatic conditions are collected, and all maintenance and rehabilitation treatments are documented in great detail.

---

The core element of the developed method is a Bayesian approach. The presented model differentiates between the true condition state of a road surface, observations in the form of condition measurements, and an estimated system behavior at discrete points in time. By combining an a priori system behavior with the continuous comparison between expected and noisy measured condition states, the true condition state of an evaluation section is deduced. The method offers the possibility of a probabilistic prognosis of the most likely condition development over time in order to reflect the large variety of possible condition state developments accurately. The developed method is presented by the example of rutting. Since the condition state development of a road surface is subject to a large number of influencing variables, considerable scattering is observed, which makes it challenging to arrive at an appropriate condition state prognosis. In order to reduce the uncertainties in the forecast, additional information is integrated into the model. First of all, potential influencing factors are identified, and the resulting hypotheses are subjected to a statistical test. The analyses are done with the help of a longitudinal structural equation model (SEM), which is gradually extended by the variable traffic loading. At the end of the investigations, the results calculated with the stochastic prediction model are compared to the results of the previously used deterministic prognosis methods.

As a result, the condition data can be improved by estimating the state distribution after 20 years. Compared to the unprocessed condition data, the deviation between true and predicted mean values can be reduced from 1.0 mm ( $SD = 1.2$  mm) to 0.1 mm ( $SD = 1.5$  mm). In addition to improved prognosis, the data can be enhanced significantly to provide the data basis used to estimate transition matrices. After data preparation, only about 5 % of all evaluation sections have a condition state improvement, whereas in the case of non-processed data, approx. 50 % of the data basis must be discarded due to measured condition state improvements. Due to the enlarged data basis, the transition distributions within the matrices can be modeled more precisely. Based on further differentiation of the state changes according to traffic loads and the respective present type of structure, the condition state distributions of all evaluation sections can be predicted with high accuracy. The deviation of the mean value between true and predicted condition state distribution is 0.0 mm. For the associated standard deviation, a value of 2.6 mm is predicted compared to the standard deviation of the true condition state distribution of 3.2 mm. The comparison between the deterministic and the stochastic method shows that the developed model provides comparable prognosis results to the deterministic method used in the current German guidelines RPE-Stra 01.

The developed probabilistic model allows consideration of the current uncertainties in the estimation of the remaining service life as well as in the planning of maintenance works. The comparison of different maintenance strategies based on probability distributions provides the basis for risk-based decision-making. This fact represents the main advantage, in contrast to deterministic prognosis methods. The high variability in the development of road condition indicates that essential factors influencing the temporal behavior of pavements are currently not recorded across the road network. In particular, this includes information on bearing capacity, which is not yet available at the current time throughout the network. This approach will be focussed in the future since the causes of road surface damages can be thoroughly analyzed only by considering the structural behavior of the road section. Furthermore, a fundamental prerequisite is the systematic documentation and maintenance of all collected data. With the help of this essential information, the condition prognosis can finally be refined.

---

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>Vorwort .....</b>	<b>i</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>ix</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>xix</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Einführung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung .....	1
1.2 Motivation und Problemstellung .....	2
1.3 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit .....	3
1.4 Aufbau der Arbeit und methodische Vorgehensweise.....	4
<b>2 Grundlagen des Erhaltungsmanagements .....</b>	<b>6</b>
2.1 Allgemeines .....	6
2.2 Begriffe und Definitionen .....	6
2.2.1 Straßenerhaltung .....	6
2.2.2 Erhaltungsmanagement.....	7
2.3 Rechtliche Grundlagen .....	8
2.4 Akteure und Interessen.....	10
2.5 Ziele und Anforderungen an die Straßenerhaltung .....	10
2.6 Prozesskreislauf des Erhaltungsmanagements.....	11
2.6.1 Datenmanagement .....	13
2.6.2 Zustandserfassung und -bewertung (ZEB).....	15
2.6.3 Pavement Management System (PMS).....	37
2.6.4 Prognose der Zustandsentwicklung .....	38
2.6.5 Erhaltungsstrategie.....	41
2.6.6 Erhaltungsprogramm.....	41
2.6.7 Bauprogramm.....	43
2.6.8 Bauabwicklung .....	43
2.6.9 Controlling und Datenaktualisierung.....	44
2.7 Kapitelzusammenfassung .....	44
<b>3 Probabilistische Analyse- und Prognosemethoden .....</b>	<b>46</b>
3.1 Allgemeines .....	46
3.2 Einführung .....	46
3.3 Kategorisierung von Analyse- und Prognosemethoden .....	47

3.4	Markov-Prozess .....	52
3.4.1	Mathematische Grundlagen .....	52
3.4.2	Homogener Markov-Prozess.....	54
3.4.3	Inhomogener Markov-Prozess .....	54
3.4.4	Semi-Markov-Prozess .....	55
3.4.5	Hidden-Markov-Prozess .....	55
3.5	Survival-Analyse.....	56
3.5.1	Mathematische Grundlagen .....	57
3.6	Bayes'sche Statistik .....	58
3.6.1	Mathematische Grundlagen .....	59
3.6.2	Bayes'sche Netze .....	59
3.6.3	Dynamische Bayes'sche Netze .....	60
3.6.4	Kalman-Filter .....	61
3.7	Bisherige Methodenanwendungen .....	65
3.7.1	Anwendungen des Markov-Prozesses.....	66
3.7.2	Anwendungen der Survival-Analyse.....	75
3.7.3	Anwendungen der Bayes'schen Statistik .....	78
3.8	Vergleichende Bewertung der probabilistischen Methoden.....	79
3.9	Strukturgleichungsmodellierung.....	83
3.9.1	Mathematische Grundlagen .....	83
3.9.2	Beobachtbarkeit von Variablen .....	85
3.9.3	Längsschnittliche Strukturgleichungsverfahren.....	85
3.9.4	Plausibilitätsprüfung und Parameterbeurteilung.....	87
3.10	Kapitelzusammenfassung .....	92
<b>4</b>	<b>Datengrundlage der ZEB-Dauermessstrecke BAB A5.....</b>	<b>94</b>
4.1	Allgemeines.....	94
4.2	Einführung .....	94
4.3	Zustandsdaten.....	95
4.4	Verkehrsdaten .....	100
4.5	Daten der betrieblichen und baulichen Erhaltung.....	101
4.6	Aufbaudaten .....	104
4.7	Klimadaten.....	106
4.8	Kapitelzusammenfassung .....	106
<b>5</b>	<b>Voruntersuchungen und Simulation.....</b>	<b>107</b>
5.1	Allgemeines.....	107
5.2	Problemstellung .....	107
5.3	Untersuchung der empirischen Datengrundlage .....	109

5.3.1	Allgemeines .....	109
5.3.2	Einfluss einer Feinsynchronisierung .....	110
5.3.3	Einfluss der Auswerteabschnittslänge.....	114
5.3.4	Einfluss von Erhaltungsmaßnahmen .....	116
5.3.5	Einfluss der Verkehrsbelastung.....	118
5.3.6	Einfluss der Bauweise.....	120
5.3.7	Bewertung der Ergebnisse .....	122
5.4	Statistische Grundlagen.....	123
5.5	Simulation.....	128
5.5.1	Allgemeines .....	128
5.5.2	Modellierungsschritte .....	129
5.5.3	Ergebnisse .....	132
5.5.4	Bewertung der Ergebnisse .....	135
5.6	Anwendung des Kalman-Filters auf Straßenzustandsdaten .....	135
5.6.1	Allgemeines .....	135
5.6.2	Datengrundlage und -aufbereitung.....	137
5.6.3	Parametrisierung mittels Simulation .....	138
5.6.4	Ergebnisse .....	141
5.6.5	Bewertung der Ergebnisse .....	142
5.7	Kapitelzusammenfassung .....	143
<b>6</b>	<b>Analyse der Zustandsentwicklung.....</b>	<b>144</b>
6.1	Allgemeines .....	144
6.2	Ableitung von Fragestellungen und Hypothesenbildung .....	144
6.2.1	Analyse des Schadensverlaufs.....	145
6.2.2	Einfluss der Verkehrsbelastung.....	146
6.3	Entwicklung von Modellvarianten .....	148
6.3.1	Vorüberlegungen und Anforderungen an ein Modell .....	148
6.3.2	Datenaufbereitung und Analysevorbereitung .....	148
6.3.3	Modellvariante A .....	153
6.3.4	Modellvariante B .....	154
6.3.5	Modellvariante C .....	155
6.4	Anwendung der Methode, Ergebnisse und Evaluation der Modellvarianten.....	155
6.4.1	Plausibilitätsprüfung, Parameterschätzung und Prüfung der Gesamtgüte .....	155
6.4.2	Vergleich der Modelle untereinander .....	157
6.5	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse .....	158
6.5.1	Prüfung der Kausalhypothesen und Analyse kausaler Effekte.....	158
6.5.2	Methodenkritik.....	161

6.6	Kapitelzusammenfassung .....	162
<b>7</b>	<b>Prognose der Zustandsentwicklung.....</b>	<b>163</b>
7.1	Allgemeines.....	163
7.2	Methodische Vorgehensweise.....	163
7.3	Festlegung und Aufbereitung der Datengrundlage.....	165
7.3.1	Aufteilung des Datensatzes in Entwicklungs- und Validierungsdaten .....	165
7.3.2	Abschätzung der wahren Zustandsentwicklung .....	166
7.4	Entwicklung von Modellvarianten.....	167
7.4.1	Modellvariante 1 .....	167
7.4.2	Modellvariante 2 .....	173
7.4.3	Modellvariante 3 .....	178
7.5	Validierung von Modellvarianten .....	185
7.5.1	Modellvariante 1 .....	185
7.5.2	Modellvariante 2 .....	187
7.5.3	Modellvariante 3 .....	189
7.6	Vergleich des Modells mit deterministischen Verhaltensfunktionen im PMS .....	193
7.6.1	Zustandsprognose mittels Koeffizientenanpassung .....	194
7.6.2	Zustandsprognose mittels Curve-Shifting-Verfahren .....	196
7.6.3	Zustandsprognose mit dem probabilistischen Modell.....	197
7.7	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse .....	200
<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtung.....</b>	<b>202</b>
8.1	Zusammenfassung.....	202
8.2	Übertragbarkeit der Methodik auf andere Zustandsmerkmale und Bauweisen .....	206
8.3	Übertragbarkeit der Methodik auf andere Straßennetze .....	206
8.4	Implementierung in ein Pavement Management System.....	207
8.5	Nutzen des probabilistischen Ansatzes.....	210
8.6	Ausblick und Empfehlungen.....	211
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>213</b>
	<b>Anlagenverzeichnis .....</b>	<b>247</b>
A1	Mess- und Auswertegenauigkeiten der Zustandsgrößen .....	248
A2	Erzeugung nutzerspezifischer ERG-Tabellen.....	249
A3	Simulation zur Parametrisierung des Kalman-Filters .....	250
A4	Ergebnisse der Strukturgleichungsmodellierung.....	256
A5	Ergebnisse des Wilcoxon-Mann-Whitney-Tests .....	265

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit und methodische Vorgehensweise .....	5
Abbildung 2: Prozesskreislauf des systematischen Erhaltungsmanagements [in Anlehnung an Degelmann 2011 und RPE-Stra in Vorbereitung] .....	13
Abbildung 3: Beispiel für die Stationierung eines Streckenabschnittes [in Anlehnung an RPE-Stra 01]	16
Abbildung 4: Ebenheit bzw. Unebenheit [FGSV 1976a] .....	18
Abbildung 5: Einteilung einer Fahrbahnoberfläche nach Wellenlängen [Huschek 1997] .....	19
Abbildung 6: Ausprägungsarten bei bleibenden Verformungen [FGSV 1976b] .....	19
Abbildung 7: Unebenheiten im Längsprofil in bituminösen Straßenbefestigungen [Schmuck 1987b] .	20
Abbildung 8: Unebenheiten in Querrichtung (Spurrinnen) in bituminösen Straßenbefestigungen [Krause 2001] .....	22
Abbildung 9: Ermittlung von Indikatoren der Querebenheit mit der Richtlatte [Schmuck 1987b] .....	23
Abbildung 10: Charakterisierung der Griffigkeit mittels Makro- und Mikrorauheit [Schmuck 1987b].	23
Abbildung 11: Rissbilder in bituminösen Straßenbefestigungen [Krause 2001] .....	25
Abbildung 12: Oberflächenschäden in bituminösen Straßenbefestigungen [Krause 2001] .....	25
Abbildung 13: Messprinzip Längsebenheit [ZTV ZEB-StB 2006] (links); Messsystem ARGUS [Lehmann+Partner GmbH 2018] (rechts) .....	26
Abbildung 14: Beispielhafte Darstellung eines Unebenheitsspektrums [AP 9/C2 1985] .....	27
Abbildung 15: Messprinzip Querebenheit [ZTV ZEB-StB 2006] (links); Messsystem ARGUS [Lehmann+Partner GmbH 2018] (rechts) .....	28
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Spurrinnentiefe (SPT) und der Fiktiven Wassertiefe (SPH) [nach DIN 13036-8] .....	29
Abbildung 17: Formel zur Berechnung des Kraftschlussbeiwertes (links); Messvorrichtung des SKM (rechts) [TP Griff-StB (SKM) 2007] .....	30
Abbildung 18: Messsystem MEFA [BASt 2018] (links); Messsystem Argus [TÜV Rheinland Schniering 2018] .....	31
Abbildung 19: Einteilung der Fahrstreifen für die Auswertung von Asphaltbefestigungen (links) [nach ZTV ZEB-StB 2006]; Veranschaulichung der Rasterfelder (rechts).....	32
Abbildung 20: Generalisierter Verlauf der Normierungsfunktion mit den beiden Fixpunkten Warn- und Schwellenwert [ZTV ZEB-StB 2018] .....	34
Abbildung 21: Verknüpfung von Zustandswerten zu Teil- und Gesamtwert für Straßenbefestigungen [BASt 2018] .....	36
Abbildung 22: Prozessschritte innerhalb der rechnergestützten Erhaltungsplanung (PMS) [Maerschalk, Krause 2010] .....	37
Abbildung 23: Zweimalige Anwendung von Verhaltensfunktionen zur Zustandsprognose innerhalb des PMS .....	38
Abbildung 24: Ermittlung der Verhaltensklasse [RPE-Stra 01].....	39
Abbildung 25: Korrektur der Verhaltensfunktion [RPE-Stra 01] .....	40
Abbildung 26: Grafische Darstellung des Nutzens einer Maßnahme [Maerschalk 2001] .....	42



Abbildung 27: „Konvex Einhüllende“ aus gewichteter Maßnahmenreihung [Maerschalk 1997] .....	43
Abbildung 28: Kategorisierung von Analyse- und Prognosemodellen [Blumenfeld, Bald 2017] .....	47
Abbildung 29: Deterministisches Prognosemodell [Blumenfeld, Bald 2017] .....	49
Abbildung 30: Probabilistisches Prognosemodell [Blumenfeld, Bald 2017] .....	51
Abbildung 31: Absolute Häufigkeiten von deterministischen und probabilistischen Verhaltensmodellen aus einer Auswertung von Kongressbeiträgen internationaler Konferenzen zum Erhaltungsmanagement von Straßen (PMS) [in Anlehnung an Scazziga 2008] .....	51
Abbildung 32: Grafische Darstellung eines Markov-Prozesses.....	53
Abbildung 33: Survivor Curve (links) und zugehörige Dichtefunktion (rechts) der Überlebenswahrscheinlichkeit [nach Lytton 1987] .....	57
Abbildung 34: Varianten dynamischer Bayes'scher Netze [Garcia 2014] .....	60
Abbildung 35: Modellstruktur des Kalman-Filters (KF).....	65
Abbildung 36: Absolute Übergangshäufigkeiten für die Zustandsgröße Spurrinnentiefe mit einer Klassenbreite von 0,1 mm [Socina 2007].....	68
Abbildung 37: Veränderung der Gesamtwerte in vier Jahren auf Bundesautobahnen in Asphaltbauweise [Hess et al. 2013] .....	69
Abbildung 38: Vergleich der prognostizierten Zustandsverläufe mittels Regression und „neuem Markov-Modell“ [Butt et al. 1987] .....	71
Abbildung 39: Prognostizierte Verkehrsbelastungen und daraus abgeschätzte Prognosefunktion des Straßenzustandes [Li et al. 1996] .....	72
Abbildung 40: Prognose der Zustandsentwicklung der Spurrinnentiefe eines 5 Jahre alten Straßenabschnittes [Blumenfeld 2016].....	73
Abbildung 41: Veränderung der Zustandsverteilung eines Brückenelements in Betonbauweise [Bortot et al. 2006] .....	74
Abbildung 42: Vergleich von berechneten "Survivor-Curves" mit Markov-Prozess, Semi-Markov-Prozess und tatsächlicher Zustandsentwicklung [Thomas, Sobanjo 2016] .....	74
Abbildung 43: Vergleich der Überlebenskurven der zementgebundenen mit bituminösen Strecken [Klinghammer et al. 1997].....	76
Abbildung 44: Verwendete Module zur rechnerischen Ermittlung von Ausfallwahrscheinlichkeiten [Oeser et al. 2017] .....	77
Abbildung 45: Gegenüberstellung von prognostizierten Zustandsentwicklungen mit verschiedenen Methoden [Hong, Prozzi 2005] .....	79
Abbildung 46: Grundstruktur eines Strukturgleichungsmodells [in Anlehnung an Steinmetz 2015] ....	83
Abbildung 47: Methoden der Strukturgleichungsanalyse [Weiber, Mühlhaus 2014] .....	85
Abbildung 48: Lageplan der ZEB-Dauermessstrecke BAB A5 in Hessen [Blumenfeld 2019] .....	94
Abbildung 49: Gegenüberstellung zweier Messkampagnen anhand von Befahrungsaufnahmen und Oberflächenbildern [Skakuj, Komma 2016].....	97
Abbildung 50: Verschiebung des Auswerterasters in Relation zum Muster-Auswerteraster [Skakuj, Komma 2016] .....	98
Abbildung 51: Häufigkeitsverteilungen der Zustandswerte im Herbst 2015 [BAST 2018] .....	98

Abbildung 52: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der Zustandsgröße MSPT im Frühjahr 2011 und 2015 .....	99
Abbildung 53: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der Zustandsgröße MSPT je Fahrstreifen im Frühjahr 2015 .....	100
Abbildung 54: Durchschnittliche tägliche Verkehrs- (DTV) und Schwerverkehrsstärken (DTV <sub>sv</sub> ) an den Zählstellen der ZEB-Dauermessstrecke in den Jahren 2005, 2010 und 2015 .....	101
Abbildung 55: Überblick zu durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen auf der ZEB-Dauermessstrecke im Zeitraum 2011-2015 .....	103
Abbildung 56: Beispiel eines Querschnitts zum Schichtenaufbau der ZEB-Dauermessstrecke .....	105
Abbildung 57: Kumulierte Häufigkeiten der Deckschichtliegezeiten der ZEB-Dauermessstrecke im Herbst 2015.....	105
Abbildung 58: Absolute Übergangshäufigkeiten für die mittleren Spurrinnentiefen (MSPT) innerhalb von vier Jahren (links: MSPT bis 20 mm, rechts: Ausschnitt der MSPT bis 10 mm). 108	
Abbildung 59: Vergleich der gemessenen Zustandsänderungen zwischen den Kampagnenvergleichen 2011/1–2015/1 und 2011/2 – 2015/2 .....	109
Abbildung 60: Absolute Anzahl an gemessenen Zustandsübergängen von 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT von hessischen Bundesautobahnen zwischen 2009 und 2013 .....	110
Abbildung 61: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen von 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT hessischer Bundesautobahnen zwischen 2009 und 2013.....	111
Abbildung 62: Absolute Anzahl an gemessenen Zustandsübergängen von nicht feinsynchronisierten 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015 .....	112
Abbildung 63: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen von nicht feinsynchronisierten 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015.....	113
Abbildung 64: Absolute Anzahl an gemessenen Zustandsübergängen von feinsynchronisierten 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015.....	113
Abbildung 65: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen von feinsynchronisierten 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011/1 und 2015/1 .....	114
Abbildung 66: Absolute Anzahl an gemessenen Zustandsübergängen von feinsynchronisierten 10-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015.....	115
Abbildung 67: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen von feinsynchronisierten 10-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015.....	116
Abbildung 68: Absolute Anzahl an gemessenen Zustandsübergängen von 100-m-Auswerteabschnitten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015 (ohne Maßnahmen links, nur Maßnahmen rechts) .....	117

Abbildung 69: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen von feinsynchronisierten 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015 mit und ohne durchgeführte Erhaltungsmaßnahmen .....	118
Abbildung 70: Gemessene Zustandsänderungen der Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke nach Fahrstreifennummer zwischen dem Frühjahr 2011 und dem Frühjahr 2015 ....	119
Abbildung 71: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen der Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen dem Frühjahr 2011 und dem Frühjahr 2015 je Fahrstreifen.....	119
Abbildung 72: Gemessene Zustandsänderungen der Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke nach Asphalt (links)- und Betonbauweise (rechts).....	120
Abbildung 73: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen der Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen dem Frühjahr 2011 und dem Frühjahr 2015 für Auswerteabschnitte in Asphalt- und Betonbauweise .....	121
Abbildung 74: Berechnung von Erwartungswert und Standardabweichung der Differenz zweier normalverteilter voneinander unabhängiger Eingangsgrößen .....	124
Abbildung 75: Zweidimensionale Fehlerverteilungen mit Isoquanten zur Darstellung von Zustandsänderungen.....	126
Abbildung 76: Grundmodell der eingesetzten Simulation.....	128
Abbildung 77: Empirische Zustandsverteilung der mittleren Spurrinnentiefe von 100-m- Auswerteabschnitten mit einer Liegezeit bis zu einem Jahr .....	130
Abbildung 78: Simulierte Zustandsverläufe der mittleren Spurrinnentiefe .....	130
Abbildung 79: Absolute Häufigkeiten an wahren Zustandsänderungen (links) und Differenzen der Messergebnisse (rechts) .....	132
Abbildung 80: Kumulierte Häufigkeiten der wahren und der gemessenen Zustandsänderungen der mittleren Spurrinnentiefen.....	133
Abbildung 81: Anteil an korrekten Beurteilungen von Zustandsänderungen auf Basis von Messwertdifferenzen in Abhängigkeit des zeitlichen Abstandes zwischen den beiden Messzeitpunkten und der Messpräzision .....	134
Abbildung 82: Grundidee zur Modellstruktur .....	136
Abbildung 83: Funktionsweise des Kalman-Filters bei einer Zeitreihe .....	137
Abbildung 84: Messergebnisse zu mehreren Erfassungszeitpunkten eines Auswerteabschnittes.....	138
Abbildung 85: Methodik zur Parametrisierung des Kalman-Filters .....	139
Abbildung 86: Mittlere Abweichung zwischen wahren und geschätzten Zuständen je Zeitschritt in Abhängigkeit des a priori Systemverhaltens.....	141
Abbildung 87: Vergleich zwischen wahren und geschätztem Zustandsverlauf eines Auswerteabschnittes .....	141
Abbildung 88: Mittlerer Zustandsverlauf der mittleren Spurrinnentiefe für Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise in Abhängigkeit der Liegezeit und 95%-Konfidenzintervall .....	146
Abbildung 89: Entwicklung der gemessenen mittleren Spurrinnentiefen in Abhängigkeit des Fahrstreifens .....	147

Abbildung 90: Verteilung der Länge der Zeitreihen über alle Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise	149
Abbildung 91: Interpolierte Stützwerte des mit Hilfe des Kalman-Filters geschätzten Zustandsverlaufs eines Auswerteabschnittes zu den Liegezeiten 0, 5, 10, 15, 20 und 25 Jahre .....	150
Abbildung 92: Verteilung der Schwerverkehrsbelastung nach Aufteilung auf die Fahrstreifen .....	152
Abbildung 93: Modellstruktur von Variante A .....	153
Abbildung 94: Modellstruktur von Variante B .....	154
Abbildung 95: Modellstruktur von Variante C .....	155
Abbildung 96: Mittelwerte der Spurrinnentiefe in Abhängigkeit der Liegezeit .....	158
Abbildung 97: Mittelwerte der Spurrinnentiefe in Abhängigkeit der Schwerverkehrsbelastung und der Liegezeit .....	160
Abbildung 98: Methodik zur Entwicklung und Validierung der Modellvarianten .....	164
Abbildung 99: Zustandsverläufe des aufbereiteten Validierungsdatensatzes .....	166
Abbildung 100: Modellstruktur zu Variante 1 .....	167
Abbildung 101: Empirische Häufigkeitsverteilung der gemessenen Zustandsänderungen und der um Zustandsverbesserungen bereinigten Zustandsänderungen innerhalb von vier Jahren von Modellvariante 1 ( $N = 1.944$ ) .....	168
Abbildung 102: Empirische absolute Übergangshäufigkeiten ohne (oben links) und mit (oben rechts) Bereinigung von gemessenen Zustandsverbesserungen sowie relative Übergangshäufigkeiten ohne (unten links) und mit (unten rechts) Bereinigung von gemessenen Zustandsverbesserungen von Modellvariante 1 .....	169
Abbildung 103: Empirischer Mittelwert und Standardabweichung der Zustandsänderungen der mittleren Spurrinnentiefe von Modellvariante 1 .....	170
Abbildung 104: Vergleich zwischen empirischen und geschätzten Übergangsverteilungen von Modellvariante 1 .....	172
Abbildung 105: Empirische (links) und geschätzte (rechts) Übergangsmatrix von Modellvariante 1.	173
Abbildung 106: Modellstruktur zu Variante 2 .....	173
Abbildung 107: Empirische Häufigkeitsverteilung der „wahren“ Zustandsänderungen und der um Zustandsverbesserungen bereinigten Zustandsänderungen innerhalb von vier Jahren von Modellvariante 2 ( $N = 2.534$ ) .....	174
Abbildung 108: Empirische absolute Übergangshäufigkeiten ohne (oben links) und mit (oben rechts) Bereinigung von gemessenen Zustandsverbesserungen sowie empirische relative Übergangshäufigkeiten ohne (unten links) und mit (unten rechts) Bereinigung von gemessenen Zustandsverbesserungen von Modellvariante 2 .....	175
Abbildung 109: Empirischer Mittelwert und Standardabweichung der Zustandsänderungen der mittleren Spurrinnentiefe von Modellvariante 2 .....	176
Abbildung 110: Vergleich zwischen empirischen und geschätzten Übergangsverteilungen von Modellvariante 2 .....	177
Abbildung 111: Empirische (links) und geschätzte (rechts) Übergangsmatrix von Modellvariante 2.	178
Abbildung 112: Modellstruktur zu Variante 3 .....	178

Abbildung 113: Empirische Häufigkeitsverteilungen der „wahren“ Zustandsänderungen innerhalb von vier Jahren je Fahrstreifen (Modellvariante 3) .....	179
Abbildung 114: Empirische Übergangsmatrizen der um Zustandsverbesserungen bereinigten Zustandsänderungen je Fahrstreifen (Modellvariante 3) .....	180
Abbildung 116: Geschätzte Übergangsmatrizen je Fahrstreifen von Modellvariante 3.....	184
Abbildung 117: Vergleich zwischen prognostiziertem mittleren Zustandsverlauf und „wahrem“ mittleren Zustandsverlauf über einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 1	185
Abbildung 118: Vergleich zwischen prognostizierter Zustandsverteilung und „wahrer“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 1 .....	186
Abbildung 119: Vergleich zwischen prognostiziertem mittleren Zustandsverlauf und „wahrem“ mittleren Zustandsverlauf über einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 2	187
Abbildung 120: Vergleich zwischen prognostizierter Zustandsverteilung und „wahrer“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 2 .....	188
Abbildung 121: Prognostizierte mittlerer Zustandsverlauf je Fahrstreifen über einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 3 .....	189
Abbildung 123: Vergleich zwischen prognostiziertem mittleren Zustandsverlauf und „wahrem“ mittleren Zustandsverlauf über einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 3	192
Abbildung 124: Vergleich zwischen der prognostizierten Gesamtverteilung und der „wahren“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 3 .....	192
Abbildung 125: Vergleich zwischen der prognostizierten Gesamtverteilung und der „wahren“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem Verfahren „Koeffizientenanpassung“ .....	195
Abbildung 126: Abweichungen zwischen den prognostizierten und den „wahren“ Zustandswerten nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem Verfahren „Koeffizientenanpassung“ .....	195
Abbildung 127: Vergleich zwischen der prognostizierten Gesamtverteilung und der „wahren“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem Curve-Shifting-Verfahren .....	196
Abbildung 128: Abweichungen zwischen den prognostizierten und den „wahren“ Zustandswerten nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem Curve-Shifting-Verfahren.....	197
Abbildung 129: Exemplarische Anwendung der entwickelten probabilistischen Prognosemethode auf einen 100-m-Auswerteabschnitt.....	198
Abbildung 130: Vergleich zwischen der prognostizierten Gesamtverteilung und der „wahren“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem probabilistischen Modell.....	199
Abbildung 131: Abweichungen zwischen den prognostizierten und den „wahren“ Zustandswerten nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem probabilistischen Modell.....	199
Abbildung 132: Konzept zur Implementierung des Modellansatzes innerhalb des Pavement Management Systems .....	209

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1: Übersicht zur Begriffssystematik der Straßenerhaltung [Maerschalk 1999; ZTV ZEB-StB 2006; Bleßmann, Böhm, Rosauer, Schäfer 2010].....	6
Tabelle 2: Zielkriterien und Erhaltungsziele der Straßenerhaltung [Bleßmann et al. 2010; RPE-Stra in Vorbereitung] .....	11
Tabelle 3: Teilprojekte der ZEB [Bühler et al. 2002] .....	15
Tabelle 4: Überblick von Merkmalsgruppen und deren Zustandsmerkmalen und -größen an Asphaltbefestigungen [nach ZTV ZEB-StB 2006 und BASt 2018].....	17
Tabelle 5: Beispiel einer Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix.....	53
Tabelle 6: Vergleichende Bewertung probabilistischer Analyse- und Prognosemethoden.....	82
Tabelle 7: Bewertungsmaßstab CFI .....	89
Tabelle 8: Bewertungsmaßstab TLI .....	90
Tabelle 9: Bewertungsmaßstab RMSEA.....	90
Tabelle 10: Bewertungsmaßstab SRMR.....	91
Tabelle 11: Übersicht zu den seit 2005 durchgeführten ZEB-Kampagnen auf der ZEB-Dauermessstrecke [Blumenfeld in Vorbereitung] .....	95
Tabelle 12: Übersicht zu den Betreibern und den eingesetzten Messsystemen je Messkampagne auf der ZEB-Dauermessstrecke .....	96
Tabelle 13: Übersicht der Verkehrszählstellen der ZEB-Dauermessstrecke .....	100
Tabelle 14: Dokumentierte Arten von Erhaltungsmaßnahmen.....	102
Tabelle 15: Dokumentierte Angaben zur betroffenen Fahrtrichtung der Maßnahmen .....	102
Tabelle 16: Kategorien zu Ursachen zur Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen .....	102
Tabelle 19: Eintrittsmöglichkeiten zur Analyse von Fehlern 1. und 2. Art [Bortz 2005] .....	126
Tabelle 20: Anteile der Fehler 1. und 2. Art bei 3.300 simulierten Auswerteabschnitten .....	133
Tabelle 21: Verteilung des Schwerverkehrs je Fahrstreifen in Abhängigkeit der vorhandenen Fahrstreifenanzahl je Fahrtrichtung [in Anlehnung an RStO 2012] .....	151
Tabelle 22: Deskriptive Ergebnisse der Schwerverkehrsbelastung.....	151
Tabelle 23: Anzahl fehlender Werte je Datengruppe .....	152
Tabelle 24: Übersicht der Ergebnisse aus den Modellvarianten A bis C.....	157
Tabelle 25: Deskriptive Ergebnisse der Spurrinnentiefe in Abhängigkeit der Liegezeit .....	158
Tabelle 26: Deskriptive Ergebnisse des $\chi^2$ -Tests zur Verteilung der Fahrstreifen auf die Entwicklungs- und Validierungsdaten .....	165
Tabelle 27: Deskriptive Ergebnisse des $\chi^2$ -Tests zur Verteilung der Bauweise auf die Entwicklungs- und Validierungsdaten .....	166
Tabelle 28: Übersicht zu den erstellten Modellvarianten.....	167
Tabelle 29: Regressionskoeffizienten des Mittelwertes und der Standardabweichung der geschätzten Übergangshäufigkeitsverteilungen über alle Zustandsklassen für Modellvariante 1.	171
Tabelle 30: Regressionskoeffizienten des Mittelwertes und der Standardabweichung der geschätzten Übergangshäufigkeiten über alle Zustandsklassen für Modellvariante 2 .....	177

---

Tabelle 31: Regressionskoeffizienten des Mittelwertes und der Standardabweichung der geschätzten Übergangshäufigkeiten über alle Zustandsklassen für Modellvariante 3.....	183
Tabelle 32: Statistische Kenngrößen der „wahren“ und prognostizierten Zustandsverteilung der mittleren Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren für Modellvariante 1.	186
Tabelle 33: Statistische Kenngrößen der „wahren“ und prognostizierten Zustandsverteilung der mittleren Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren für Modellvariante 2.	188
Tabelle 35: Statistische Kenngrößen der „wahren“ und prognostizierten Gesamtverteilung der mittleren Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren für Modellvariante 3.	193
Tabelle 36: Statistische Kenngrößen der „wahren“ und prognostizierten Zustandsverteilung für die Zustandswerte der mittleren Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem Verfahren „Koeffizientenanpassung“ .....	194
Tabelle 37: Statistische Kenngrößen der „wahren“ und prognostizierten Zustandsverteilung für die Zustandswerte der mittleren Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem Curve-Shifting-Verfahren .....	196
Tabelle 38: Statistische Kenngrößen der „wahren“ und prognostizierten Zustandsverteilung für die Zustandswerte der mittleren Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem probabilistischen Modell .....	198
Tabelle 39: Geforderte Mess- und Auswertegenauigkeit zur Qualitätssicherung von Zustandsdaten (Asphaltbauweise) [ZTV ZEB-StB 2006] .....	248
Tabelle 40: Ergebnisse des Wilcoxon-Mann-Whitney-Tests (U-Test) .....	265

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

AC	Asphaltbeton
AD	Autobahndreieck
AK	Autobahnkreuz
AM	Autobahnmeisterei
AP	Arbeitspapier
AS	Anschlussstelle
ASB	Anweisung Straßeninformationsbank
AUN	Allgemeine Unebenheit
AWGN	Additives weißes gaußsches Rauschen
BAB	Bundesautobahn
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BKM	Betriebskilometer
BLP	Bewertetes Längsprofil
BMS	Brücken Management System
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BWA	Asphaltbauweise
CFI	Comparative Fit Index
DBL	Spannweite des bewerteten Höhenlängsprofils
df	Anzahl der Freiheitsgrade
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMS	Dauermessstrecke
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
DTV <sub>sv</sub>	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs
DSK	Dünne Asphaltdeckschicht in Kaltbauweise
ERG	Ergebnis
EÜ	Eigenüberwachung
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FIML	Full Information Maximum Likelihood
FLI	Flickstellen
FS	Fahrstreifen
FStrG	Bundesfernstraßengesetz
FWD	Falling-Weight-Deflectometer
GEB	Gebrauchswert
GG	Grundgesetz
GPS	Global Positioning System
GRI	Griffigkeit
GW	Gesamtwert
HDM	Highway Development and Maintenance Model
HMM	Hidden Markov Model
iFFT	inverse Fast-Fourier-Transformation
IRI	International Roughness Index
KEB	Koordiniertes Erhaltungs- und Bauprogramm
KF	Kalman-Filter
Kfz	Kraftfahrzeug
KP	Kontrollprüfung
KPI	Key-Performance-Indicator



---

LED	light-emitting diodes
LGM	Latente Wachstumskurvenmodelle
LWI	Längsebenheitswirkindex
<i>M</i>	Mittelwert
MA	Gussasphalt
<i>Max</i>	Maximum
<i>Min</i>	Minimum
MSPH	Mittlere fiktive Wassertiefe
MSPT	Mittlere Spurrinnentiefe
MSPTL	Linke mittlere Spurrinnentiefe
MSPTR	Rechte mittlere Spurrinnentiefe
MZP	Messzeitpunkt
<i>N</i>	Stichprobengröße
n. b.	nicht bekannt
NNFI	Non-Normed Fit Index
NNK	nach Netzknoten
OB	Oberflächenbehandlung
PCI	Pavement Condition Index
PCS	Pavement Condition State
PMS	Pavement Management System
PMS-I/O	Input/Output eines Pavement Management Systems
QN	Querneigung
RISS	Risse
RMR	Root Mean Square Residual
RMSEA	Root Mean Square Error of Approximation
RSFA	Restschadensfläche für Asphaltbefestigungen
RSFB	Restschadensfläche für Betonbefestigungen
S	Standstreifen
SBL	Standardabweichung des bewerteten Höhenlängsprofils
SCRIM	Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine
<i>SD</i>	Standardabweichung
SEM	Structural Equation Modeling
SIB	Straßeninformationsbank
SKM	Seitenkraftmessverfahren
SMA	Splittmastixasphalt
SPH	Fiktive Wassertiefe
SPT	Spurrinnentiefe
SRMR	Standardized Root Mean Square Residual
SUB	Substanzwert Oberfläche
TLI	Tucker-Lewis-Index
TP	Teilprojekt
TP	Technische Prüfvorschrift
TSD	Traffic-Speed-Deflectometer
TWE	Teilwert Ebenheit
TWELQ	Teilwert Ebenheit/Längs- und Querprofil
TWN	Teilwert Nässe
TWRIO	Teilwert Risse/Oberflächenschäden
USA	United States of America
VNK	von Netzknoten
VV	Verwaltungsvorschrift

---

W	Welligkeit
ZbBz	Zeitbefristete Betriebszulassung
ZEB	Zustandserfassung und -bewertung
ZEB ERG	Ergebnisdatei der ZEB
ZG	Zustandsgröße
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen
ZW	Zustandswert



---

# 1 Einführung

---

## 1.1 Einleitung

Das deutsche Fernstraßennetz ist eines der leistungsstärksten Verkehrsnetze in Europa. Durch die zentrale Lage Deutschlands innerhalb von Europa spielt es eine entscheidende Rolle für den europäischen Transitverkehr. Nach Fitschen und Nordmann [2016] wird etwa die Hälfte der Jahresfahrleistung aller Kraftfahrzeuge in Deutschland auf deutschen Bundesfernstraßen (etwa ein Drittel auf Bundesautobahnen) umgesetzt. Für eine mittel- bis langfristige Gewährleistung von Qualitätszielen, wie z. B. eine hohe Verkehrssicherheit und Leistungsfähigkeit des Fernstraßennetzes, hat die Bundesregierung im Sommer 2016 den Bundesverkehrswegeplan 2030 verabschiedet, welcher ein Gesamtinvestitionsvolumen von 270 Mrd. Euro umfasst. Ein Finanzvolumen von ca. 133 Mrd. Euro ist für Bauprojekte von Bundesfernstraßen vorgesehen, wovon wiederum etwa 70 Mrd. Euro für die Erhaltung dieser Straßenbauwerke angesetzt sind [BMVI 2016].

Um die politischen und strategischen Ziele mit Hilfe dieses bedeutenden Investitionsvolumens bestmöglich erreichen zu können, bedarf es geeigneter Planungs- und Steuerungsinstrumente. Schon Schmuck und Hehenberger [1993, S. 1] stellten fest, dass es mit steigendem Bedarf an finanziellen Mitteln für die Erhaltung des Straßennetzes, zunehmend wichtiger wird, *„zuverlässige Methoden vorzuhalten, die optimale Handlungsanleitungen für die Straßenerhaltung ergeben“*. Im Hinblick auf einen steigenden Erhaltungsbedarf der Straßeninfrastruktur wird nach Kübler [2014, S. 525] die Beurteilung des Zustandes der Straßenbefestigung *„sowohl technisch als auch wirtschaftlich“* eine große Bedeutung haben. Nach Heller [2012, S. 8] ist *„das Treffen vom Optimum abweichender Entscheidungen mit erheblichen volkswirtschaftlichen Verlusten verbunden und muss nach Möglichkeit vermieden werden“*. Hierfür sind geeignete Methoden zu entwickeln und anzuwenden, um den aktuellen Zustand des Straßennetzes zu erfassen und zu bewerten sowie dessen zukünftige Entwicklung unter definierten Randbedingungen verlässlich abzuschätzen. Diese Ergebnisse werden anschließend dazu genutzt, um Erhaltungsmaßnahmen unter Berücksichtigung zielspezifischer Optimierungskriterien zu analysieren und zu bewerten [Maerschalk, Krause, Stöckert, Zander 2020] und somit den zukünftigen Erhaltungsbedarf eines Straßennetzes über einen festgelegten Prognosezeitraum abzuschätzen.

In Deutschland kommt hierfür seit etwa Beginn der 2000er Jahre ein Pavement Management System (PMS) zum Einsatz. Ein wesentliches Modul innerhalb des PMS stellt die Zustandsprognose dar. Sie dient dem Zweck, den Straßenzustand sowohl vor als auch nach Durchführung von baulichen Maßnahmen zu prognostizieren. Für die Prognose des Straßenzustandes werden in Deutschland und dessen Nachbarländern derzeit deterministische Modelle in Form von Verhaltensfunktionen eingesetzt. Diese Modelle wurden auf den Ergebnissen empirischer Untersuchungen entwickelt und im Laufe der Jahre kontinuierlich kalibriert. Deterministische Modelle stellen ein vergleichsweise einfaches mathematisches Werkzeug zur Prognose des Fahrbahnzustandes dar. Diese beruhen auf der Annahme, dass sämtliche Einflussfaktoren sowie deren Ausprägungen bekannt sind und diese anhand einer einzelnen Verhaltensfunktion abgebildet werden können. Zu den Nachteilen solcher deterministischen Modelle zählt, dass die tatsächlich vorliegenden Streuungen der Zustandsdaten sowie die Variabilität der Zustandsentwicklung einer Straße nicht ausreichend wiedergegeben werden. Des Weiteren können Abhängigkeiten bzw. Ursache–Wirkungs-Beziehungen innerhalb des Systems nur sehr begrenzt dargestellt und analysiert werden.

---

Daher wurde in den vergangenen Jahren zunehmend versucht, die Anwendbarkeit von probabilistischen Ansätzen innerhalb des Erhaltungsmanagements von Straßen zu überprüfen. Diese Modelle ermöglichen es, multivariate Fragestellungen zu beantworten und die ausgeprägten Streuungen von Zustandsdaten in Abhängigkeit von definierten, ebenfalls streuenden Einflussfaktoren treffend abzubilden.

## 1.2 Motivation und Problemstellung

Für einen zielgerichteten Einsatz der verfügbaren Finanzmittel in der Straßenerhaltung stellt das Wissen über den aktuellen und den zukünftigen Zustand des Straßennetzes eine maßgebende Eingangsgröße dar. Eine exakte Dokumentation des aktuellen Zustandes als auch eine präzise Prognose der zukünftigen Zustandsentwicklung sind für ein effektives Erhaltungsmanagement essentiell [Flintsch, McGhee 2009; Pierce, McGovern, Zimmerman 2013]. Diese werden benötigt, um belastbare und transparente Entscheidungen auf der strategischen und operativen Ebene treffen zu können, sodass unvermeidbare Beeinträchtigungen innerhalb des Netzes aufgrund von umfangreichen Erhaltungsmaßnahmen für die Nutzer möglichst gering gehalten werden [Saliminejad 2016]. Aufgrund der Größe und Bedeutung des Straßennetzes und dem darin befindlichen immensen Anlagevermögen bewirken selbst geringe Ungenauigkeiten in den Messergebnissen Unsicherheiten im Hinblick auf eine monetäre Bewertung sowie eine Abschätzung des zukünftigen Erhaltungs- bzw. Budgetbedarfs [Pierce, Zimmerman 2014].

Eine wesentliche Grundlage des Erhaltungsmanagements ist daher eine zuverlässige und ausreichend genaue Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) des Straßennetzes in regelmäßigen Zeitabständen. In Abhängigkeit des aktuellen Netzzustandes, der gewählten Erhaltungsstrategie und der darauf aufbauenden Zustandsprognose können vorgeschlagene Maßnahmen miteinander verglichen und koordiniert werden, um den Einsatz der für die Erhaltung verfügbaren Finanzmittel zu optimieren [Schmuck, Oefner, Rezanka 1985; Schmuck, Maerschalk 1987].

Die bisher eingesetzten deterministischen Prognosemodelle sind seit Jahrzehnten etabliert, leicht verständlich und mit vergleichsweise geringem Aufwand anzuwenden. Auf Basis des aktuellen Zustandes sowie weiterer Randbedingungen, wie z. B. Verkehrsbelastung und Aufbau, werden zunächst verhaltenshomogene Abschnitte gebildet. Anschließend wird jedem homogenen Abschnitt auf Basis des aktuellen Zustandes und des Alters eine Verhaltensklasse mit einer zugehörigen charakteristischen Verhaltensfunktion zugeordnet und diese mit Hilfe von vorgegebenen Randbedingungen kalibriert [Hess, Schweibenz, Stöckner, Zander 2018].

Die weitverbreiteten deterministischen Prognosemodelle weisen jedoch eine Reihe von Nachteilen auf, die zu Ungenauigkeiten in der Prognose des Straßenzustandes führen, sodass die Abschätzung des zukünftigen Straßenzustandes zum Teil keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert. Nach Maerschalk [2001] beinhalten diese Modelle die Annahme, dass in den aktuell gemessenen Zustandsdaten sämtliche Einflüsse aus Baustoffeigenschaften, Einbaubedingungen, Verkehrsbelastung etc. widerspiegelt werden. Die alleinige Berücksichtigung des Alters des homogenen Abschnittes und des gemessenen Zustandes der aktuellen Messkampagne als Eingangsgrößen für eine Zustandsprognose ist jedoch äußerst kritisch zu bewerten, da dies zu einer Überbewertung der Messergebnisse der aktuellen Erfassungskampagne führen kann. Hierbei wird die bisherige Zustandsentwicklung eines homogenen Abschnittes nicht berücksichtigt, obgleich sich daraus wichtige Erkenntnisse zum weiteren Zustandsverhalten ableiten lassen.

---

Weiterhin ist die Zuordnung eines charakteristischen Zustandsverlaufs anhand einer einzelnen Messung stark mit Unsicherheit behaftet. Die Problematik wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass der vorgegebene Funktionstyp (degressiv vs. progressiv) innerhalb einer Zustandsmerkmalsgruppe teilweise variieren kann [vgl. RPE-Stra 01; Maerschalk, Socina 2008].

Des Weiteren werden weder Messabweichungen noch Messtoleranzen bei der Erfassung im Rahmen der Auswertung von Straßenzustandsdaten berücksichtigt [Hinsch, Krause, Maerschalk, Rübensam 2005]. Jede Messung ist jedoch natürlichen Streuungen unterworfen, die eine Abweichung des Messergebnisses vom tatsächlichen Systemzustand bedingen. Erfassungsbedingte Messabweichungen führen zu einer kleinen oder teilweise größeren Unschärfe im Messergebnis, die sich auf die Prognose des weiteren Zustandsverlaufs unmittelbar auswirkt.

Zum einen liegt die beschriebene Problemstellung darin begründet, dass die Zustandsentwicklung einer Straße durch eine Vielzahl an Einflussfaktoren und deren Überlagerung charakterisiert ist und deren komplexe Ursache–Wirkungs-Zusammenhänge nur äußerst schwer zu erfassen und zu beschreiben sind. Zum anderen erschwert die Messpräzision bei der Zustandserfassung eine treffende abschnittsbezogene Zustandsprognose. Es besteht daher die Notwendigkeit, Methoden zu entwickeln, die den Umgang mit Ungewissheit und deren Berücksichtigung bei der Zustandsprognose erlauben.

Mit Hilfe von probabilistischen Methoden sollte es möglich sein, die ausgeprägten Streuungen von Straßenzustandsdaten in der Zustandsprognose abzubilden und somit die Grundlage für ein risikobasiertes Erhaltungsmanagement zu schaffen. Probabilistische Methoden sind zwar im Vergleich zu den deterministischen Verfahren deutlich komplexer, verfügen jedoch über den bedeutenden Vorteil der Abbildung von Unsicherheiten. Die generelle Anwendbarkeit probabilistischer Methoden auf Straßenzustandsdaten konnte mittlerweile im Rahmen mehrerer Forschungsarbeiten aufgezeigt werden [Bellman 1955; Golabi, Kulkarni, Way 1982; Koch 1992; Weninger-Vycudil, Brozek, Simanek, Litzka 2016]. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigten jedoch auch die folgenden, bisher nicht zufriedenstellend gelösten Problemstellungen bei der Erstellung von probabilistischen Modellen auf:

- Umgang mit Messabweichungen und Messunsicherheiten [Mašović, Hajdin 2014; Simpson, Bryce, Rada, Groeger 2018]
- Umgang mit nicht dokumentierten Erhaltungsmaßnahmen [Solorio, Flintsch, Garnica, Moreno 2017; Bryce, Rada 2018]
- Analyse und Abbildung von Ursache–Wirkungs-Zusammenhängen zwischen Oberflächenmerkmalen, externen Einflussgrößen sowie dem materialspezifischen Werkstoffverhalten [Weninger-Vycudil et al. 2016]
- Modellierung von nicht-linearen Schadensverläufen zur verbesserten Abbildung der Zustandsentwicklung [Weninger-Vycudil, Simanek, Rohringer, Haberl 2009; Hoffmann, Donev 2016]

Eine netzweite Anwendung probabilistischer Methoden konnte in Deutschland bisher nicht erfolgen, da in Bezug auf die zuvor beschriebenen Untersuchungsaspekte nach wie vor erhebliche Forschungsdesiderate bestehen.

### **1.3 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit**

Auf Basis der zuvor beschriebenen Problemstellung ist das Ziel dieser Arbeit, eine Methodik für die Prognose der Zustandsentwicklung von Straßen zu erarbeiten, die als Grundlage für die Abschätzung des zukünftigen Erhaltungsbedarfs genutzt werden kann.

---

Die zu entwickelnde Methode soll eine probabilistische Prognose der Zustandsentwicklung auf Basis von Zustandsgrößen ermöglichen, um die große Variation von möglichen Zustandsverläufen treffend abzubilden und hierbei

- allgemeingültig formuliert werden, sodass eine Anwendung auf alle Zustandsmerkmale grundsätzlich ermöglicht wird,
- die Problematik zum Umgang mit Messunsicherheiten und den Effekt von Erhaltungsmaßnahmen adressieren
- zudem stets erweiterbar sein, sodass Erkenntnisse aus aktuellen Forschungen in das Modell integriert werden können.

Für die Entwicklung und -validierung von Modellvarianten wird die Methodik exemplarisch am Beispiel der Ebenheit im Querprofil (mittlere Spurrinnentiefe) auf ein Teilnetz angewendet. Die Ergebnisse werden den Prognoseergebnissen der bisherigen deterministischen Auswertemethoden vergleichend gegenübergestellt und anhand dieser Gegenüberstellung bewertet. Die entwickelten Algorithmen sollen als Grundlage für eine potentielle Implementierung und netzweite Anwendung im Rahmen eines Pavement Management Systems (PMS) verwendet werden können.

#### **1.4 Aufbau der Arbeit und methodische Vorgehensweise**

In dem folgenden Abschnitt ist eine Übersicht zum Aufbau der Arbeit sowie der damit in Bezug stehenden methodischen Vorgehensweise zum Erreichen der genannten Zielsetzung dargestellt. Die Arbeit gliedert sich in insgesamt acht Kapitel, welche im Folgenden erläutert werden.

Um die in dieser Arbeit entwickelten Fragestellungen beantworten zu können, bedarf es zunächst einer Darstellung der theoretischen und empirischen Erkenntnisse im Hinblick auf die Analyse und Prognose von Straßenzustandsdaten. Dazu werden in Kapitel 2 die Grundlagen des systematischen Erhaltungsmanagements von Bundesfernstraßen in Deutschland erläutert.

Eine ausführliche Darstellung der bisherigen Erkenntnisse auf internationaler Ebene zu probabilistischen Analyse- und Prognosemethoden wird in Kapitel 3 gegeben. Die damit verbundenen Grundlagen und bisherigen Anwendungen dieser Methoden auf Fragestellungen in unterschiedlichen Fachgebieten, insbesondere innerhalb des Erhaltungsmanagements, werden dargelegt. Weiterhin werden die mathematischen Grundlagen der Strukturgleichungsmodellierung erläutert.

In Kapitel 4 wird die in dieser Arbeit verwendete Datengrundlage der ZEB-Dauermessstrecke BAB A5 in Hessen vorgestellt.

Im Anschluss daran erfolgt in Kapitel 5 die Konkretisierung der Fragestellungen anhand von statistischen Vorüberlegungen und einer Simulationsstudie. Schließlich wird eine Methodik erarbeitet, modelliert und getestet, die eine Lösung der Problemstellung ermöglicht.

Um das entwickelte Modell zu verfeinern, wird in Kapitel 6 ein strukturprüfendes Verfahren auf die Daten der ZEB-Dauermessstrecke angewendet. Zu Beginn der Modellierung werden aus den in der Literatur beschriebenen Theorien zur Zustandsentwicklung einer Fahrbahnoberfläche Hypothesen abgeleitet, die anhand eines Modells und der aufbereiteten Datengrundlage einer statistischen Prüfung unterzogen werden. Die Grundlage hierbei bildet ein Wachstumskurvenmodell, welches in mehreren Arbeitsschritten erweitert wird.

In Kapitel 7 erfolgt anschließend die Entwicklung und Validierung eines Prognosemodells, welches auf einen Validierungsdatensatz der ZEB-Dauermessstrecke angewendet wird. Dazu werden drei Modellvarianten entwickelt, die sich in Bezug auf die Datenaufbereitung sowie die Berücksichtigung von Prädiktoren differenzieren lassen. Die Prognoseergebnisse dieser Modellvarianten werden vergleichend gegenübergestellt. Zusätzlich erfolgt ein Vergleich mit den bisher eingesetzten deterministischen Verhaltensfunktionen.

Den Abschluss dieser Arbeit bildet Kapitel 8 mit einer Schlussbetrachtung, in der die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst werden und ein Ausblick zu zukünftig denkbaren Untersuchungen gegeben wird. In der Diskussion der Ergebnisse wird insbesondere beurteilt, inwiefern ein erhöhter Aufwand bei der Erstellung probabilistischer Modelle zu einer Verbesserung der Zustandsprognose bzw. zu einem Erkenntnisgewinn führt. Der Ausblick beinhaltet weiterhin eine Beurteilung darüber, wie eine Übertragung der Methodik auf weitere Zustandsmerkmale und andere Straßennetze erfolgen kann und welche Anpassungen im Hinblick auf eine zukünftige Anwendung in Pavement Management Systemen notwendig sind.

In der nachfolgenden Abbildung 1 sind der zuvor beschriebene Aufbau der Arbeit und die methodische Vorgehensweise grafisch dargestellt.

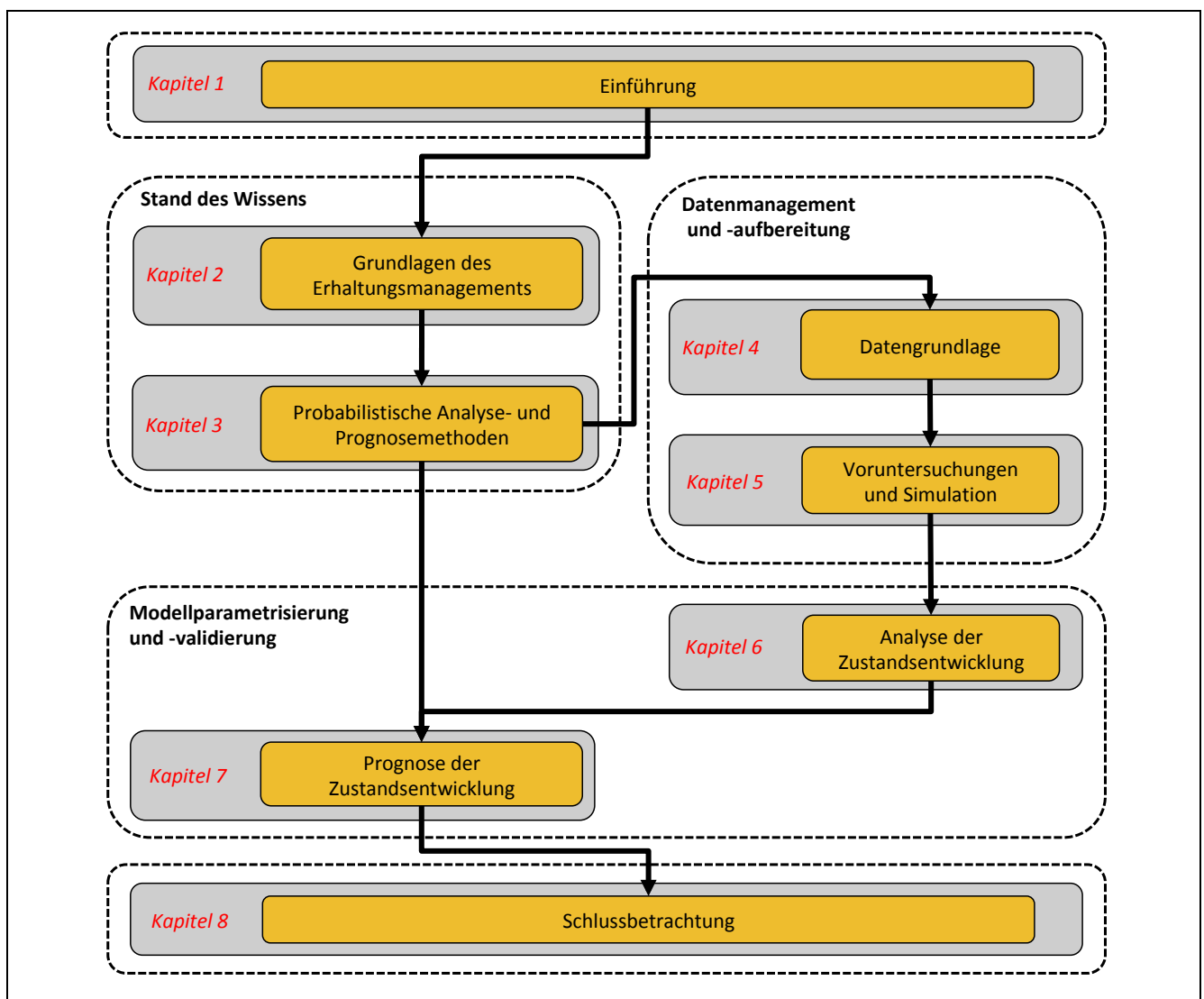


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit und methodische Vorgehensweise



## 2 Grundlagen des Erhaltungsmanagements

### 2.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des systematischen Erhaltungsmanagements von Straßen vorgestellt. Hierzu wird zunächst auf die Begriffssystematik innerhalb der Straßenerhaltung eingegangen, die für das Verstehen der weiteren Grundlagen notwendig ist. Aufbauend auf den rechtlichen Grundlagen sowie den involvierten Akteuren und ihren Interessen werden die strategischen Ziele erläutert, die innerhalb des Erhaltungsmanagements mit Hilfe eines Prozesskreislaufes verfolgt werden. Einen wesentlichen Bestandteil dieses Prozesskreislaufes bilden die Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) sowie die Zustandsprognose. Das Kapitel wird mit einer Zusammenstellung der auf den Ergebnissen der ZEB aufbauenden Arbeitsschritte, wie z. B. der Erstellung des Erhaltungsprogramms und der Maßnahmenplanung, die im Zusammenspiel zwischen der strategischen und der operativen Ebene erarbeitet werden, fortgeführt und schließt mit dem Controlling mittels Kennzahlen und der Aktualisierung der Daten.

### 2.2 Begriffe und Definitionen

#### 2.2.1 Straßenerhaltung

Der Begriff der **Straßenerhaltung** beinhaltet alle Maßnahmen an sowie auf Straßenverkehrs- und Nebenanlagen, die der Sicherung oder der Wiederherstellung der Substanz und/oder des Gebrauchswertes von Verkehrsflächen einschließlich der Nebenflächen sowie der Umweltverträglichkeit dienen [ZTV BEA-StB 2009, ZTV BEB-StB 2015]. Die Straßenerhaltung grenzt sich von Maßnahmen des Um- und Ausbaus, der Erweiterung sowie des Neubaus ab und ist zunächst in die betriebliche und in die bauliche Erhaltung zu untergliedern. Eine Übersicht zur Begriffssystematik der Straßenerhaltung ist in der Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht zur Begriffssystematik der Straßenerhaltung [Maerschalk 1999; ZTV ZEB-StB 2006; Bleßmann, Böhm, Rosauer, Schäfer 2010]

Straßenerhaltung	Betriebliche Erhaltung	Kontrolle (z. B. Zustandserfassung)	
		Wartung (z. B. Straßenreinigung, Winterdienst)	
	Bauliche Erhaltung	Instandhaltung (örtlich-punktueller oder kleinflächige Maßnahmen) (z. B. Vergießen von Rissen, kleinflächige Flickarbeiten)	
		Instandsetzung (großflächige Maßnahmen)	I1 – auf der Deckschicht (z. B. Oberflächenbehandlung, DSK)
			I2 – an der Deckschicht (z. B. Hoch-/Tiefeinbau der Deckschicht)
		Erneuerung (großflächige Maßnahmen)	E1 – an der Decke (z. B. Hoch-/Tiefeinbau der Decke)
			E2 – an Tragschicht(en) / am Oberbau (z. B. Verstärkung, Tiefeinbau einschließlich der Tragschicht(en))

---

Die **betriebliche Erhaltung** beinhaltet routinemäßige Kontrollen des Straßenzustandes sowie regelmäßige Wartungsarbeiten an Straßenbefestigungen [ZTV BEA-StB 2009, ZTV BEB-StB 2015].

Diese **Kontrollen und Wartungsarbeiten** dienen zur Erfüllung der Verkehrssicherungspflicht und zur Überwachung von Gesetzen, Vorschriften und baulichen Auflagen hinsichtlich der Einhaltung und Beachtung [Straube, Beckedahl 2000]. Dies erfolgt zum einen durch Befahrungen und der augenscheinlichen Kontrolle der Streckenabschnitte durch die Straßenmeisterei bzw. den Betriebsdienst. Zum anderen erfolgt die messtechnische Erfassung des Straßenzustandes in regelmäßigen Zeitabständen; in Deutschland alle vier Jahre.

Im Gegensatz zur betrieblichen Erhaltung umfasst die **bauliche Erhaltung** alle großflächigen Maßnahmen zur baulichen Erhaltung von Verkehrsflächen. Sie gliedert sich in Instandhaltung, Instandsetzung und Erneuerung von Straßenbefestigungen [ZTV BEA-StB 2009, ZTV BEB-StB 2015].

Die **Instandhaltung** umfasst bauliche Maßnahmen kleineren Umfangs zur Substanzerhaltung von Verkehrsflächen, die mit geringem Aufwand in der Regel unverzüglich nach dem Auftreten eines örtlich begrenzten Schadens von Hand oder maschinell ausgeführt werden [ZTV BEA-StB 2009]. Hierunter sind z. B. das Vergießen von Rissen sowie kleinflächige Flickarbeiten im Rahmen des Unterhaltungs- und Betriebsdienstes zu sehen [RPE-Stra 01].

Die **Instandsetzung** beinhaltet großflächige bauliche Maßnahmen, die auf oder an der Deckschicht ausgeführt werden. Hierunter zählen bspw. Oberflächenbehandlungen (OB) und Dünnschichtbeläge im Kalteinbau (DSK) auf der bestehenden Deckschicht. Unter Maßnahmen an der Deckschicht fällt bspw. der Hoch-/Tiefereinbau einer Deckschicht. Diese Maßnahmen dienen der Substanzerhaltung oder der Verbesserung der Oberflächeneigenschaften von Verkehrsflächen und werden auf zusammenhängenden Flächen, in der Regel in Fahrstreifenbreite bis zu einer Dicke von 4 cm ausgeführt [Wermuth 2012].

Die **Erneuerung** umfasst großflächige bauliche Maßnahmen zur vollständigen Wiederherstellung der Oberflächeneigenschaften und der Substanz von Verkehrsflächenbefestigungen oder Teilen davon, sofern bei Asphaltbauweisen mehr als die Deckschicht betroffen ist [ZTV BEA-StB 2009, ZTV BEB-StB 2015]. Dies beinhaltet Maßnahmen, die entweder an der Decke (E1-Maßnahmen), wie z. B. Hoch- oder Tiefereinbau der Binder- und Deckschicht, oder an den Tragschichten bzw. am Oberbau (E2-Maßnahmen), wie z. B. Verstärkung, Tiefereinbau einschließlich der Tragschicht(en), durchgeführt werden.

### 2.2.2 Erhaltungsmanagement

In Ergänzung zur Begriffsdefinition der Straßenerhaltung bedarf es zunächst weiterhin einer Erläuterung des Begriffs **Erhaltungsmanagement**. Nach Schmuck [1987a] besteht die Aufgabe eines (Erhaltungs-)Managements darin, die notwendigen Handlungsentscheidungen rational, nach zielbezogenen Kriterien systematisch zu treffen. Das Erhaltungsmanagement ist eine spezielle Planungsaufgabe, die sich aus mehreren Kernprozessen zusammensetzt. Nach den Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßen (RPE-Stra) [in Vorbereitung] sind diese Kernprozesse:

- die Entwicklung einer Erhaltungsstrategie,
- die Erarbeitung von Maßnahmevorschlägen,
- die Maßnahmenkoordinierung,
- die Maßnahmenrealisierung,

- die Datenaktualisierung und
- die Bewertung des erzielten Ergebnisses sowie des Gesamtprozesses

Eine detaillierte Darstellung dieser Kernprozesse ist Kapitel 2.6 zu entnehmen.

## 2.3 Rechtliche Grundlagen

Die rechtlichen Grundlagen zur Notwendigkeit der Durchführung eines systematischen Erhaltungsmanagements von Straßen sind im Bundesfernstraßengesetz (FStrG) festgelegt [Wehner, Siedek, Schulze 1979]. Demzufolge beinhaltet die Straßenbaulast alle mit dem Bau und der Unterhaltung der Bundesfernstraßen zusammenhängenden Aufgaben, die in § 3 Abs. 1 FStrG explizit erläutert werden. Dazu heißt es:

*„Die Träger der Straßenbaulast haben nach ihrer Leistungsfähigkeit die Bundesfernstraßen in einem dem regelmäßigen Verkehrsbedürfnis genügenden Zustand zu bauen, zu unterhalten, zu erweitern oder sonst zu verbessern.“*

Nach Krause [2001] ist diesen Verpflichtungen unter Berücksichtigung aller öffentlichen Belange einschließlich der Anforderungen aus dem Umweltschutz nachzukommen. Des Weiteren haben die Straßenbaulastträger gemäß § 4 FStrG für einen sicheren und den ordnungsrelevanten Anforderungen genügenden Zustand ihrer Bauten zu sorgen:

*„Die Träger der Straßenbaulast haben dafür einzustehen, dass ihre Bauten allen Anforderungen der Sicherheit und Ordnung genügen. Behördlicher Genehmigungen, Erlaubnisse und Abnahmen durch andere als die Straßenbaubehörden bedarf es nicht.“*

Die in dem Fernstraßengesetz enthaltenen Regelungen basieren nicht zuletzt auf den gesetzlichen Vorgaben bezüglich der Verpflichtungen und Rechte aufgrund von Eigentum nach Art. 14 (2) GG:

*„Eigentum verpflichtet. Sein Gebrauch soll zugleich dem Wohle der Allgemeinheit dienen.“*

In Art. 90 (1) des Grundgesetzes werden hierzu die Eigentumsverhältnisse des Bundesfernstraßennetzes geregelt:

*„Der Bund bleibt Eigentümer der Bundesautobahnen und sonstigen Bundesstraßen des Fernverkehrs. Das Eigentum ist unveräußerlich.“*

Zukünftig wird eine Bundesgesellschaft die Verwaltung der Bundesautobahnen übernehmen [Hess et al. 2018]. Dazu heißt es in Art. 90 (2) GG:

*„Die Verwaltung der Bundesautobahnen wird in Bundesverwaltung geführt. Der Bund kann sich zur Erledigung seiner Aufgaben einer Gesellschaft privaten Rechts bedienen. Diese Gesellschaft steht im unveräußerlichen Eigentum des Bundes. Eine unmittelbare Beteiligung Dritter an der Gesellschaft und deren Tochtergesellschaften ist ausgeschlossen.“*

Im Sinne der zuvor genannten rechtlichen Grundlagen ist festzustellen, dass der Straßenbaulastträger die Straßenverkehrsanlagen sowohl baulich als auch betrieblich zu erhalten hat [Bleßmann et al. 2010]. Unterlässt der Straßenbaulastträger hingegen ihm zumutbare Aufwendungen bzw. Maßnahmen, um einen Straßenzustand zu gewährleisten, der dem regelmäßigen Verkehrsbedürfnis entspricht, können bei vorliegender Kausalität gegen den Baulastträger Schadensersatzforderungen gemäß § 823 BGB gestellt werden:

---

*(1) „Wer vorsätzlich oder fahrlässig das Leben, den Körper, die Gesundheit, die Freiheit, das Eigentum oder ein sonstiges Recht eines anderen widerrechtlich verletzt, ist dem anderen zum Ersatz des daraus entstehenden Schadens verpflichtet.“*

*(2) „Die gleiche Verpflichtung trifft denjenigen, welcher gegen ein den Schutz eines anderen bezweckendes Gesetz verstößt. Ist nach dem Inhalt des Gesetzes ein Verstoß gegen dieses auch ohne Verschulden möglich, so tritt die Ersatzpflicht nur im Falle des Verschuldens ein.“*

Zum einen ist der Straßenbaulastträger gesetzlich verpflichtet sein obliegendes Straßennetz durch regelmäßige betriebliche und bauliche Erhaltungsmaßnahmen in Stand zu halten. Zum anderen ist er dazu angehalten, die Ausgaben aus dem Finanzhaushalt, angesichts eines begrenzten finanziellen Handlungsspielraums, sorgfältig zu prüfen. Die Bundes- und Landesverwaltungen sind gemäß den Haushaltsordnungen dazu verpflichtet, wirtschaftlich und sparsam mit den zur Verfügung stehenden Finanzmitteln umzugehen. In der Bundeshaushaltsordnung (BHO) heißt es dazu in § 7 wie folgt:

*(1) „Bei Aufstellung und Ausführung des Haushaltsplans sind die Grundsätze der Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit zu beachten. Diese Grundsätze verpflichten zur Prüfung, inwieweit staatliche Aufgaben oder öffentlichen Zwecken dienende wirtschaftliche Tätigkeiten durch Ausgliederung und Entstaatlichung oder Privatisierung erfüllt werden können.“*

*(2) „Für alle finanzwirksamen Maßnahmen sind angemessene Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen durchzuführen. Dabei ist auch die mit den Maßnahmen verbundene Risikoverteilung zu berücksichtigen.“*

Zusätzlich werden diverse Regelungen zu Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen als ein Planungsinstrument in § 7 BHO gegeben zu denen Folgendes geregelt ist:

*„Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen müssen mindestens Aussagen zu folgenden Teilaspekten enthalten:*

- Analyse der Ausgangslage und des Handlungsbedarfs*
- Zeitplan für die Durchführung der Maßnahme“*

Die Erhaltung des Anlagevermögens sowie die Gewährleistung der Sicherheit und der Nutzungsfähigkeit sollen mit dem Ziel der Minimierung der gesamtwirtschaftlichen Kosten erfolgen [Krause 2001]. Die Straßenbauverwaltungen tragen die Verantwortung dafür, dass die öffentlich-rechtlichen Vorschriften sowie die anerkannten Regeln der Technik eingehalten werden. Wird die Verkehrssicherungspflicht öffentlich-rechtlich als Amtspflicht wahrgenommen, greifen bei fahrlässiger Verletzung die Amtshaftungsgrundsätze nach Art. 34 des GG bzw. § 839 BGB. Darin heißt es, wenn

*„ ... jemand in Ausübung eines ihm anvertrauten Amtes die ihm einem Dritten gegenüber obliegende Amtspflicht verletzt, so trifft die Verantwortlichkeit grundsätzlich den Staat oder die Körperschaft, in deren Dienst er steht“.*

Die dargestellten rechtlichen Grundlagen verdeutlichen, dass der Straßenbaulastträger innerhalb eines gesetzlichen Spannungsfeldes agieren muss. Einerseits hat dieser zu gewährleisten, dass sich sein Straßennetz und dessen bauliche Anlagen in einem angemessenen Zustand befinden. Andererseits muss er hierbei unter Berücksichtigung festgelegter finanzieller und personeller Ressourcen agieren. Diese Zielvorgaben und Randbedingungen werden durch die Akteure und deren Interessen definiert.

---

## 2.4 Akteure und Interessen

Um die Anforderungen an ein Straßennetz und die damit einhergehenden Kernprozesse des Erhaltungsmanagements systematisch analysieren zu können, ist es zunächst zwingend erforderlich alle betroffenen Akteure zu identifizieren und deren Position und Interessen innerhalb des Gesamtsystems zu erkennen [Aguy et al. 2012]. Auf der Bundesebene sind insgesamt drei Gruppen von Akteuren mit ihren jeweiligen Untergruppen zu nennen, die sich in Anlehnung an Degelmann und Heller [2016] wie folgt differenzieren lassen:

- I. Nutzer
  - a. Private Verkehrsteilnehmer im Arbeitsverkehr
  - b. Private Verkehrsteilnehmer bei sonstiger Nutzung
  - c. Gewerbliche Verkehrsteilnehmer
- II. Straßenbaulastträger
  - a. Infrastrukturbetreiber
  - b. Finanzier
- III. Dritte
  - a. Private Anlieger
  - b. Gewerbliche Anlieger
  - c. Nutzer des öffentlichen Raums

In Bezug auf die Bundesfernstraßen trägt der Bund die Straßenbaulast für den Großteil des Straßennetzes. Er beauftragt die Bundesländer und/oder zukünftig andere Organisationen mit der Planung, dem Bau, dem Betrieb und der Erhaltung der Straßeninfrastruktur und stellt dem potentiellen Nutzer ein Straßennetz in einer definierten Angebotsqualität zur Verfügung. Der Nutzer stellt hingegen Anforderungen bzgl. der Funktionalität und des Komforts an das Straßennetz, welche der Baulastträger in seine Planungsabläufe aufnimmt. Zusätzlich ergeben sich Anforderungen von Dritten im Hinblick auf Fragen der Umwelt und Nachhaltigkeit.

Jede dieser genannten Gruppen verfolgt eigene Ziele, die sich teilweise widersprechen können [Haas, Felio, Lounis, Falls 2009]. Letztlich entscheidet jedoch die Summe aller Bürger in Form einer Gesellschaft über ihre gewählten Vertreter und die beauftragten Institutionen über Werte und Normen, die bei der Erhaltung von Straßenverkehrsanlagen zu berücksichtigen sind.

## 2.5 Ziele und Anforderungen an die Straßenerhaltung

Aus den Erwartungen und Anforderungen der Akteure lassen sich zunächst allgemeine Zielkriterien ableiten. Auf der Grundlage dieser Ziele und Anforderungen erstellt die Bundesregierung eine Gesamtstrategie im Hinblick auf die langfristige Entwicklung des Bundesfernstraßennetzes, die in den Bundesverkehrswegeplan miteinfließt [Maerschalk, Krause, Stöckert, Zander 2020]. Aus den von der politischen Ebene vorgegebenen Zielen können wiederum eigene Ziele der Straßenerhaltung entwickelt werden. Die Tabelle 2 zeigt die klassischen Zielkriterien innerhalb des Verkehrssektors und die daraus abgeleiteten Ziele der Straßenerhaltung.

Tabelle 2: Zielkriterien und Erhaltungsziele der Straßenerhaltung [Bleßmann et al. 2010; RPE-Stra in Vorbereitung]

Zielkriterium	Erhaltungsziele
Sicherheit	Die Gewährleistung eines definierten Sicherheitsniveaus des Straßenzustandes soll eine sichere Nutzung der Straßeninfrastruktur (auch für Fußgänger und Radfahrer) ermöglichen.
Befahrbarkeit / Leistungsfähigkeit	Die Erhaltung der Straßeninfrastruktur ist bedarfsgerecht zu planen und durchzuführen. Verkehrsbeeinträchtigungen durch Arbeitsstellen sind auf das notwendige Maß zu beschränken.
Wirtschaftlichkeit	Im Rahmen der Erhaltung der Straßeninfrastruktur ist der Grundsatz des wirtschaftlichen Ressourceneinsatzes zu beachten. Die Erhaltung soll das Anlagevermögen der Straßeninfrastruktur sichern.
Umwelt	Die Planung und Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen sind so zu gestalten, dass Beeinträchtigungen der Umwelt minimal sind und die natürlichen Ressourcen gemäß dem Leitbild der Nachhaltigkeit geschont werden.

Im Rahmen der Erhaltungsplanung sind alle formulierten Ziele zu würdigen und untereinander zu gewichten. Sie sind eine wesentliche Eingangsgröße, die innerhalb des Prozesskreislaufs des systematischen Erhaltungsmanagements Berücksichtigung findet. Sowohl die Ziele als auch deren Gewichtung sind regelmäßig innerhalb eines normativen Prozesses zu überprüfen und ggf. anzupassen. Die gewählten Ziele müssen erreichbar sein und dienen als Grundlage für eine Erhaltungsstrategie [RPE-Stra in Vorbereitung].

## 2.6 Prozesskreislauf des Erhaltungsmanagements

Die Erwartungen und Anforderungen der Akteure und die daraus abgeleiteten Ziele können nachhaltig nur mit Hilfe eines systematischen Ansatzes verfolgt und erreicht werden. Der Infrastrukturbetreiber benötigt geeignete Managementwerkzeuge, die es ihm ermöglichen, die Qualität des Anlagenzustandes in Abhängigkeit der eingesetzten finanziellen und personellen Mittel darzustellen und diesen Prozess anhand von geeigneten Kriterien zu bewerten, zu optimieren und darauf basierend Entscheidungen zu treffen [Blumenfeld, Bald 2017].

Zu diesem Zweck wurde daher ein komplexes Managementsystem mit integriertem Erfassungs- und Bewertungssystem konzipiert. Das Ziel dieses Managementsystems ist die Ermittlung des optimalen Handelns, welches nach Schmuck [1987a, S. 4] anhand der folgenden Leitfrage aufgestellt werden kann:

*„Wer trifft wie, zu welchem Zweck, wann und unter welchen Bedingungen welche Entscheidungen, die zu welchen Resultaten führen?“*

Die Idee eines prozessorientierten Qualitätsmanagements wurde in der strategischen Erhaltungsplanung von Straßen bereits in den 1980er Jahren eingeführt [Rafi 1985; Schmuck 1987a, 1987b] und seitdem durch umfangreiche Forschungen wissenschaftlich begleitet und weiterentwickelt

---

[Kretz 2014]. Dieses beinhaltet, unabhängig von der Granularität des Regelkreises, die folgenden wesentlichen Grundelemente [Iwojlow 2014]:

- Zielsetzung
- Planung
- Entscheidungsfindung
- Realisierung
- Kontrolle

Die **Zielsetzung** erfolgt indirekt durch Vorgaben der Gesellschaft, welche diese durch Gesetze vorgibt (vgl. Kapitel 2.4 und 2.5). Innerhalb des Erhaltungsmanagements ist das Wissen über die Qualität des Anlagenzustandes, d. h. dem aktuellen Zustand des Straßennetzes in allen Abschnitten des Netzes, von höchster Bedeutung. Daher muss im Rahmen der **Planung** zunächst der aktuelle Zustand des Systems beurteilt werden. Anschließend sind verschiedene Handlungsoptionen zu entwickeln, die als Entscheidungsgrundlage dienen. Nach Schmuck [1987b] lässt sich diese Phase in die folgenden Teilaufgaben untergliedern:

- Sammlung von Informationen im Zuge einer Zustandserfassung
- Verarbeiten dieser Informationen im Rahmen einer Zustandsbewertung und Aufbereitung der Bewertungsergebnisse durch Reihung der Straßenabschnitte entsprechend der zeitlichen Priorität, mit der Erhaltungsmaßnahmen einzuleiten sind („Dringlichkeitsreihung“)
- Prognose der in der Zukunft zu erwartenden Zustandsentwicklungen (Zustandsänderungen) in Folge von Bauart und Bemessung, verkehrlichen und klimatischen Bedingungen bedingten Einflüssen sowie Prognose des zukünftig zu erwartenden Erhaltungsbedarfs

Die Grundlage für jede Art des **Entscheidungsprozesses** ist das Wissen über den aktuellen Zustand und die zu erwartende Entwicklung eines Systems, die Bewertung dieser Zustände unter Berücksichtigung der jeweils vorherrschenden Randbedingungen sowie die zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen mit ihren Auswirkungen auf Nutzen und Kosten. Nachdem der Zustand erfasst und bewertet ist, sind Aktionen einzuleiten bzw. Maßnahmen zu **realisieren**. Am Ende ist die Leistung zu **kontrollieren** und den zu Beginn gesetzten Zielen gegenüber zu stellen.

Der Prozesskreislauf für das systematische Erhaltungsmanagement von Straßen innerhalb der politischen, strategischen und operativen Ebene ist in der Abbildung 2 dargestellt.

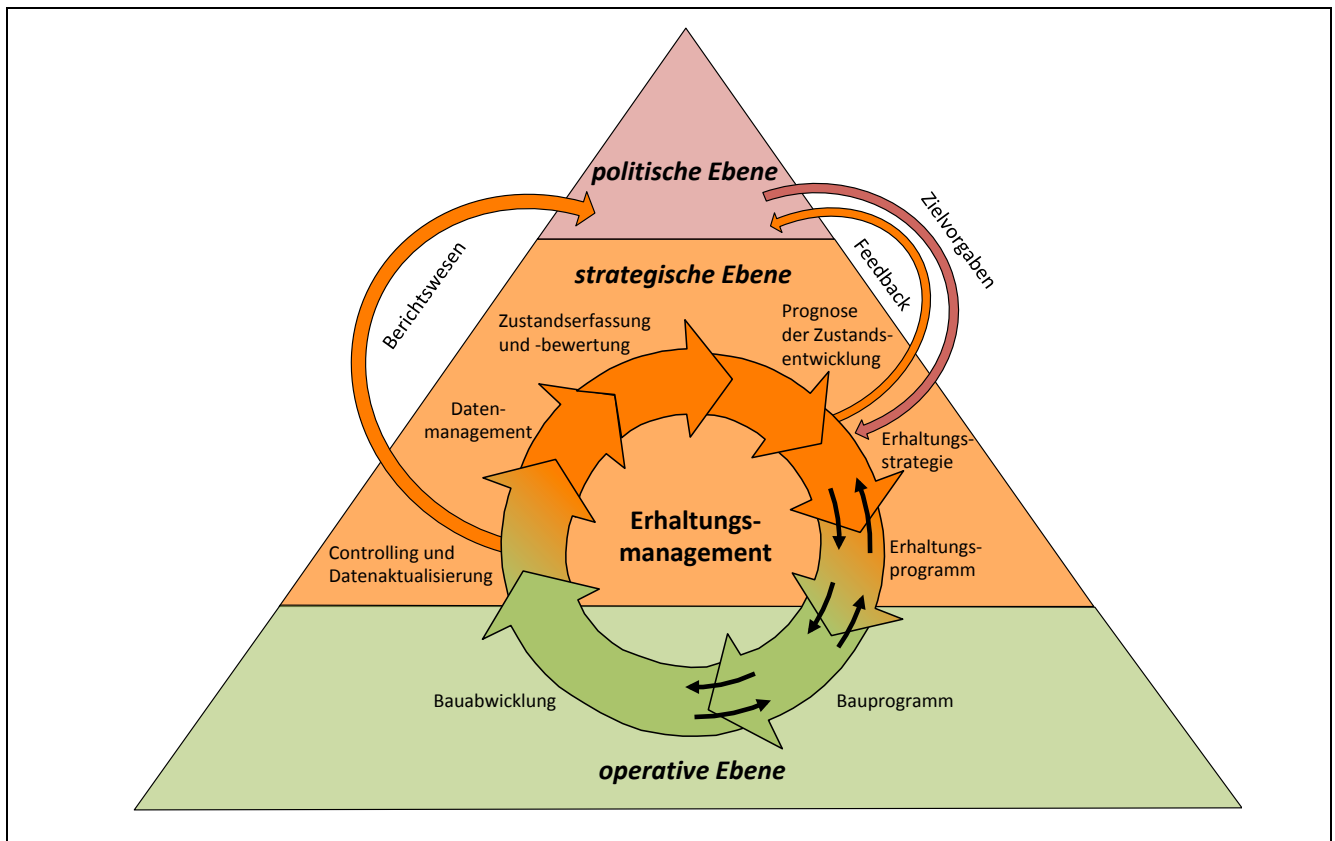


Abbildung 2: Prozesskreislauf des systematischen Erhaltungsmanagements [in Anlehnung an Degelmann 2011 und RPE-Stra in Vorbereitung]

Ein Datenmanagement (Kapitel 2.6.1) stellt zunächst die Grundvoraussetzung für eine systematische Erhaltungsplanung dar. Ein weiterer wesentlicher Baustein ist die Zustandserfassung und -bewertung (Kapitel 2.6.2) mit Hilfe derer der aktuelle Zustand des Straßennetzes ermittelt wird. Darauf aufbauend erfolgt die Prognose der Zustandsentwicklung (Kapitel 2.6.4) über einen zu definierenden Betrachtungszeitraum. In Abhängigkeit der gewählten Erhaltungsstrategie (Kapitel 2.6.5) und weiterer Randbedingungen kann mit Hilfe eines rechnergestützten Pavement Management Systems (PMS) der zukünftige Erhaltungsbedarf abgeschätzt und ein Erhaltungsprogramm (Kapitel 2.6.6) erstellt werden. Die Aufstellung eines Bauprogramms (Kapitel 2.6.7), die Bauabwicklung (Kapitel 2.6.8) sowie das Controlling und Datenaktualisierung (Kapitel 2.6.9) bilden schließlich das letzte Bindeglied innerhalb des Prozesskreislaufs.

Im nachfolgenden Abschnitt werden die einzelnen Komponenten des Prozesskreislaufs innerhalb des Erhaltungsmanagements auf der strategischen und der operativen Ebene erläutert.

### 2.6.1 Datenmanagement

Das Datenmanagement beinhaltet die Verwaltung von verschiedenen Datengruppen, die im Folgenden erläutert werden. Sowohl die Vollständigkeit als auch die Qualität der verwendeten Datengrundlage haben einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Aussagen sowie die Akzeptanz der Ergebnisse [Weninger-Vycudil et al. 2016], sodass absolute Mindestanforderungen im Hinblick auf die Datenqualität erfüllt werden müssen [Hess et al. 2018]. Dazu zählen nach Maerschalk, Krause, Socina, Köhler und Stöckner [2012] Leitdaten, Zustandsdaten, Querschnittsdaten, Aufbaudaten, Verkehrsda-



---

ten und Maßnahmedaten. Mittelfristig sind zusätzlich weitere Datengruppen systematisch zu erfassen, um ganzheitliche Bewertungen aller Tätigkeiten im Erhaltungsmanagement bewerten zu können.

#### **2.6.1.1 Leitdaten**

Für die Verarbeitung und Visualisierung von Sachdaten, ist ein Ordnungssystem zur Codierung des zu verwaltenden Straßennetzes zu erstellen und zu pflegen [Krause 2001]. Hierfür wurde in den 1990er Jahren ein Ordnungssystem nach der Anweisung Straßeninformationsbank (ASB) entwickelt, welches aus einem Netzknoten- und Stationierungsmodell besteht. Es stellt das grundlegende Werkzeug für eine einheitliche Aufnahme, Bearbeitung und Vorhaltung von Straßendaten dar [Löcherer 2015]. Mit Hilfe dieses Ordnungssystems können alle straßenbezogenen Daten auf eine Straßenachse projiziert werden (vgl. Kapitel 2.6.2.1).

#### **2.6.1.2 Zustandsdaten**

Zustandsdaten stellen die wichtigste Datengrundlage in der Straßenerhaltung dar. Sie geben Informationen zum Zustand der Fahrbahnoberfläche. Die Zustandsdaten werden im Rahmen der regelmäßig durchgeführten ZEB ermittelt (vgl. Kapitel 2.6.2). Der Zustand einer Fahrbahnoberfläche wird durch die entsprechenden Merkmalsgruppen bzw. Zustandsmerkmale, wie z. B. die Ebenheit im Längs- und Querprofil, die Rauheit und die Substanzmerkmale (Oberfläche) definiert, welche sich quantitativ durch Zustandsindikatoren beschreiben lassen (vgl. Kapitel 2.6.2.2) [Rafi 1985].

#### **2.6.1.3 Querschnittsdaten**

Querschnittsdaten beinhalten Informationen zu den einzelnen Elementen eines Straßenquerschnitts. Die Grundlage hierfür stellt die Anweisung Straßeninformationsbank (ASB), die einen Querschnittstreifen in homogene Teilelemente untergliedert, wie z. B. Fahrbahn, Gehweg, Standstreifen, Mittelstreifen etc. Ein vereinfachtes Modell wird in der Regel bei der ZEB verwendet, welches ausschließlich die Anzahl an Fahrbahnen und Fahrstreifen je Fahrbahn codiert. Nach Heller et al. [2015] reichen diese vereinfachten Informationen aus, um den Zustand einzelnen Fahrstreifen zuordnen zu können.

#### **2.6.1.4 Aufbaudaten**

Aufbaudaten dienen zur Beschreibung des Befestigungsaufbaus. Relevante Informationen hierzu sind die Art der einzelnen Befestigungsschichten, die Dicke und das Alter der eingebauten Schichten sowie die Eigenschaften der eingebauten Materialien innerhalb einer Schicht, wie z. B. Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt, Verdichtungsgrad etc. [Dröge 2017]. Die Erfassung dieser Daten erfolgt durch die Auswertung von Kontrollprüfungen, Bohrkernuntersuchungen sowie ggf. Befragung des Personals in Straßenbauämtern und -meistereien [Krause 2001]. Nach Zander [2017] existieren in Deutschland nicht flächendeckend Datenbanken, die Informationen zum Aufbau der Schichten innerhalb eines Straßenabschnittes bereithalten. Informationen zur aktuellen Liegezeit stellen jedoch insbesondere bei der Abschätzung des zukünftigen Erhaltungsbedarfs eine wichtige Rolle. Zusätzlich können Informationen über den strukturellen Zustand des Oberbaus anhand von Tragfähigkeitsmessungen wichtige Eingangsgrößen für das zukünftige Verhalten des Straßenoberbaus darstellen. Da die bisherigen Methoden zur Erfassung der Tragfähigkeit, wie z. B. mit Hilfe des Falling-Weight-Deflectometers (FWD), nur punktuelle Messungen ermöglichen, liegen netzweite Daten zur strukturellen Substanz bisher nicht vor [Blumenfeld, Bald 2017].

### 2.6.1.5 Verkehrsdaten

Hinsichtlich der Zustandsentwicklung von Straßenbefestigungen, insbesondere von Bundesfernstraßen, stellt die Verkehrsbelastung eine der wesentlichen Einflussgrößen dar [Rosauer 2010]. Verkehrsdaten werden u. a. durch die Kennzahlen der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) und der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke des Schwerverkehrs (DTV<sub>sv</sub>) beschrieben [Heller et al. 2015]. Für die Ermittlung von gewichteten statistischen Kennzahlen werden die Verkehrsdaten nach Richtungsfahstreifen getrennt benötigt. Diese Daten sind derzeit zum Großteil nur aufwendig aus den Erfassungen von Dauerzählstellen zu ermitteln.

### 2.6.1.6 Daten zu durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen

Im Hinblick auf die Prognose der Zustandsentwicklung von Straßen ist die vollständige Dokumentation von durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen von entscheidender Bedeutung [Klinghammer, Huber, Nagel 1997]. Erhaltungsmaßnahmen führen in der Regel zu einer signifikanten Verbesserung des (Oberflächen-)Zustandes, welche in der Auswertung von Zustandsdaten wiederzufinden ist. Um die unbeeinflusste Schadensentwicklung mit Hilfe von Modellen abbilden zu können, müssen daher Straßenabschnitte, bei denen zwischenzeitlich Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt wurden, von diesen Auswertungen ausgeschlossen werden. Aufgrund dieser oftmals fehlenden oder unvollständigen Informationen liegen nach Zander [2017] derzeit keine genauen Kenntnisse über die tatsächliche Nutzungsdauer von Straßenbefestigungen vor.

## 2.6.2 Zustandserfassung und -bewertung (ZEB)

Im Rahmen der Bereitstellung von Zustandsdaten gilt die Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) als wichtigste Grundlage für ein ganzheitliches Erhaltungsmanagement. Die systematische Erfassung und Bewertung von Zustandsmerkmalen der Fahrbahnoberfläche erfolgte erstmals 1990 auf Bundesfernstraßen [Komma 2004] und hat seither das Ziel, den Zustand nach einheitlichen Regeln zu beschreiben und daraus Zustandsentwicklungen sowie Zustandsreihungen für die mittelfristige Planung von Erhaltungsmaßnahmen abzuleiten [Suß, Krüger 1992; Schröder 2014]. Die ZEB gliedert sich in die folgenden Teilprojekte:

Tabelle 3: Teilprojekte der ZEB [Bühler et al. 2002]

Teilprojekt (TP)		Beschreibung
0		Vorbereitung der Straßennetzdaten
1	a	Erfassung der Ebenheit im Längsprofil
	b	Erfassung der Ebenheit im Querprofil
2		Erfassung der Griffigkeit
3		Erfassung der Substanzmerkmale (Oberfläche)
4		Auswertung und Bewertung der erfassten Daten

Im Rahmen des Teilprojektes 0 werden vorbereitende Arbeiten zur Durchführung der ZEB, wie z. B. die Erstellung der Grunddatentabelle des zu erfassenden Teilnetzes, vorgenommen. Innerhalb des Teilprojektes 1 erfolgt die Erfassung der Zustandsmerkmale der Ebenheit im Längs- und Querprofil.

Das Teilprojekt 2 beinhaltet die Erfassung des Zustandsmerkmals Griffigkeit. In Teilprojekt 3 werden die Substanzmerkmale der Oberfläche erfasst. Zum Abschluss der ZEB erfolgt innerhalb des Teilprojektes 4 die Auswertung und Bewertung der erfassten Daten.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Arbeitsschritte innerhalb der ZEB erläutert.

### 2.6.2.1 Netzgrundlage und Stationierungssystem

Als Grundlage für eine korrekte Zuordnung des örtlichen Geltungsbereichs der bei der Zustandserfassung gewonnenen Informationen wird ein Ordnungssystem verwendet. Diese Datengrundlage, welche im Rahmen des Teilprojektes 0 erarbeitet wird [Komma 2004], ist ein Netzknoten- und Stationierungssystem, das gemäß der Anweisung Straßeninformationsbank (ASB) anzuwenden ist [BMVI 2014].

Als Netzknoten werden Schnittpunkte von Straßenachsen bezeichnet, womit Straßenkreuzungen und -einemündungen abgebildet werden. Der sich zwischen zwei Netzknoten befindende Netzknotenabschnitt wird mit einer fortlaufenden metrischen Stationierung gekennzeichnet. Sie beginnt an einem Netzknoten bei Null und endet am nächsten Netzknoten. Durch Angabe der Lage der Fahrbahn (L/R) wird die Fahrtrichtung in bzw. gegen Stationierungsrichtung dokumentiert. Innerhalb eines längeren Streckenabschnittes wird zudem eine Lokalisierung mit Hilfe von Betriebskilometern verwendet [ZTV ZEB-StB 2006]. Anhand dessen kann die Lage sämtlicher Punkte auf dieser Bezugslinie eindeutig bestimmt werden [Krause 2001]. In jedem Abschnitt werden zudem die Fahrstreifenummern separat für jede Richtungsfahrbahn angegeben. Jeder Straßenabschnitt zwischen zwei Netzknoten wird in gleichlange Auswerteabschnitte untergliedert. Bei der messtechnischen Zustandserfassung von Außerortsstraßen beträgt die Länge eines Auswerteabschnitts 100 m, auf den sich die Auswertung der Zustandserfassung bezieht [ZTV ZEB-StB 2006].

In der Abbildung 3 ist die Systematik zur Stationierung eines Streckenabschnittes beispielhaft dargestellt.

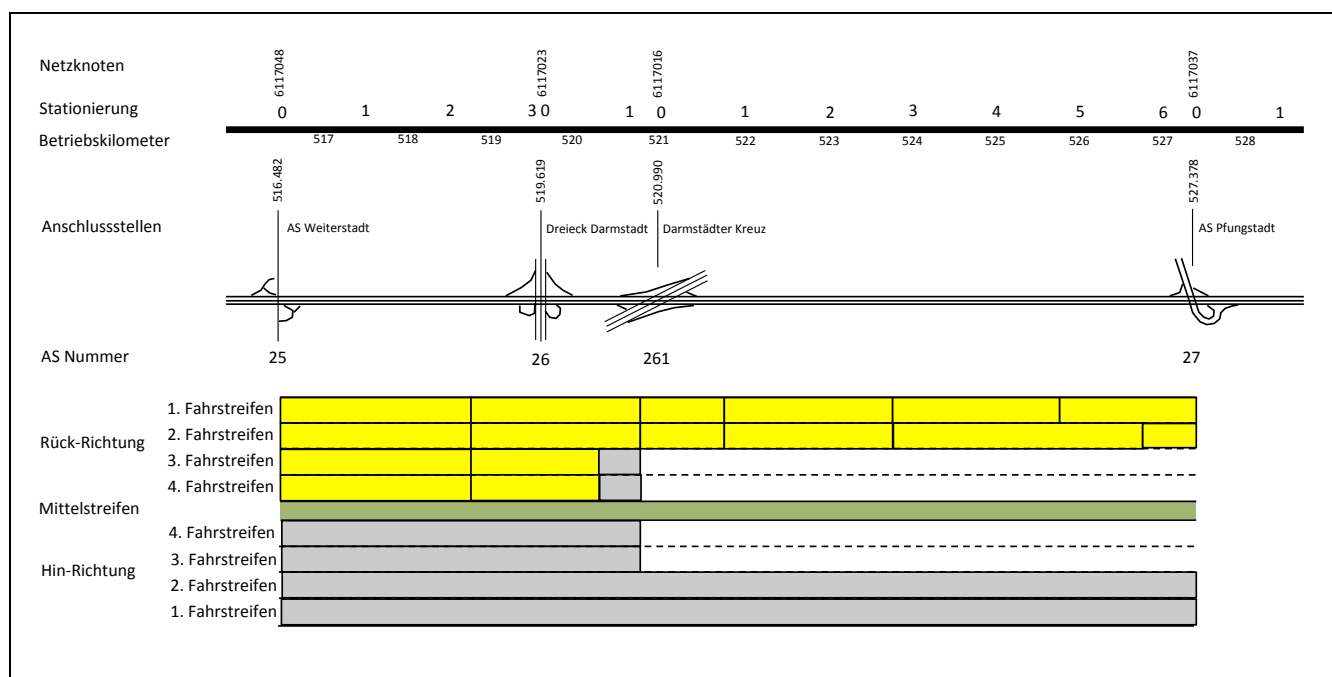


Abbildung 3: Beispiel für die Stationierung eines Streckenabschnittes [in Anlehnung an RPE-Stra 01]

### 2.6.2.2 Zustandsmerkmale

Das Ziel von Zustandserfassungen ist die Dokumentation des Schädigungsgrads einer Straßenbefestigung in Bezug auf bestimmte, ausgewählte Zustandsmerkmale [Weninger-Vycudil et al. 2009]. Die Zustandsmerkmale werden für eine quantitative und qualitative Beurteilung des Straßenzustandes herangezogen, anhand von Messgrößen innerhalb der Teilprojekte 1 bis 3 erfasst [Komma 2004] und in Teilprojekt 4 bewertet. Um den Zustand einer Straßenbefestigung zu beschreiben, werden objektive und messbare Bewertungskriterien genutzt. Der Straßenzustand wird in Bezug auf die Oberflächeneigenschaften einer Straße anhand der Oberflächengestalt, Oberflächenschäden, Formänderungsverhalten und Oberflächenwirkungen charakterisiert [Schmuck 1987b]. Hierzu zählen u. a. die Ebenheit im Längs- und Querprofil, Griffigkeit, Art, Ausmaß und Anzahl von Schadstellen an der Oberfläche, Helligkeit und Reflexionsvermögen. Die als Zustandsmerkmale bezeichneten Eigenschaften einer Straße werden anhand von Zustandsindikatoren beschrieben. Für eine quantitative Bewertung einzelner Zustandsmerkmale werden schließlich Zustandsgrößen herangezogen, die vollständig mit Hilfe von hoch entwickelten Messsystemen erfasst werden. Ein Überblick zur Systematik der Merkmalsgruppen und deren zugehörigen Zustandsmerkmalen, -indikatoren und -größen in Deutschland ist in Tabelle 4 gegeben.

Tabelle 4: Überblick von Merkmalsgruppen und deren Zustandsmerkmalen und -größen an Asphaltbefestigungen [nach ZTV ZEB-StB 2006 und BASt 2018]

Merkmalsgruppe	Zustandsmerkmal	Zustandsindikator	Zustandsgröße
Ebenheit im Längsprofil	Allgemeine Unebenheit	Unebenheitsmaß, spektrale Dichte der Unebenheitshöhen [cm <sup>3</sup> ]	AUN
		Längsebenheitswirkindex [-]	LWI
Ebenheit im Querprofil	Spurrinnen	Maximum aus den Mittelwerten der rechten und linken Spurrinnentiefe [mm]	MSPT
		Maximum aus den Mittelwerten der rechten und linken fiktiven Wassertiefe [mm]	MSPH
Rauheit	Griffigkeit	Seitenreibungswert (temperatur- und geschwindigkeitskorrigiert auf 40, 60 oder 80 km/h, Mittelwert) [-]	GRI_40 GRI_60 GRI_80
Substanzmerkmale (Oberfläche)	Risse	Netzrisse, Risshäufungen und Einzelrisse betroffener Flächenanteil [%]	RISS
	Restschadensfläche	Flickstellen, Ausmagerungen, Bindemittelanreicherungen, betroffener Flächenanteil [%]	RSFA

Die Zustandsgrößen können zum einen anhand von physikalischen Werten (z. B. mm, m<sup>2</sup>, usw.) beschrieben werden. Zum anderen werden sie auch als Flächen- bzw. Längenbezugswerte (Prozentwerte) dargestellt, die für eine definierte Abschnittslänge aus den Mess- oder Erfassungsgrößen gebildet werden [Weninger-Vycudil et al. 2009].

## Ebenheit

Die Ebenheit ist ein wichtiges Merkmal einer Verkehrsoberfläche. Sie wirkt sich auf die Erhaltungsziele Verkehrssicherheit und Fahrkomfort aus und kann zu einer Erhöhung der Straßenbeanspruchung der gesamten Oberbaukonstruktion führen [Stöckert, Glattki, Wasser 2014]. Die Ebenheit einer Verkehrsfläche wird anhand der Abweichungen der vorhandenen („Ist“-)Fläche von der durch den Straßenentwurf vorgegebenen („Soll“-)Fläche in allen Richtungen beurteilt [Schmuck 1987b; AP 9/C2 1985; TP Eben – Berührende Messungen 2007]. Sie beschreibt die Eigenschaft einer Straße, bei der die Wirkungen auf den Fahrer, das Fahrzeug und die Fahrbahn als Basis für die Bewertung herangezogen werden [Iwojlow 2014].

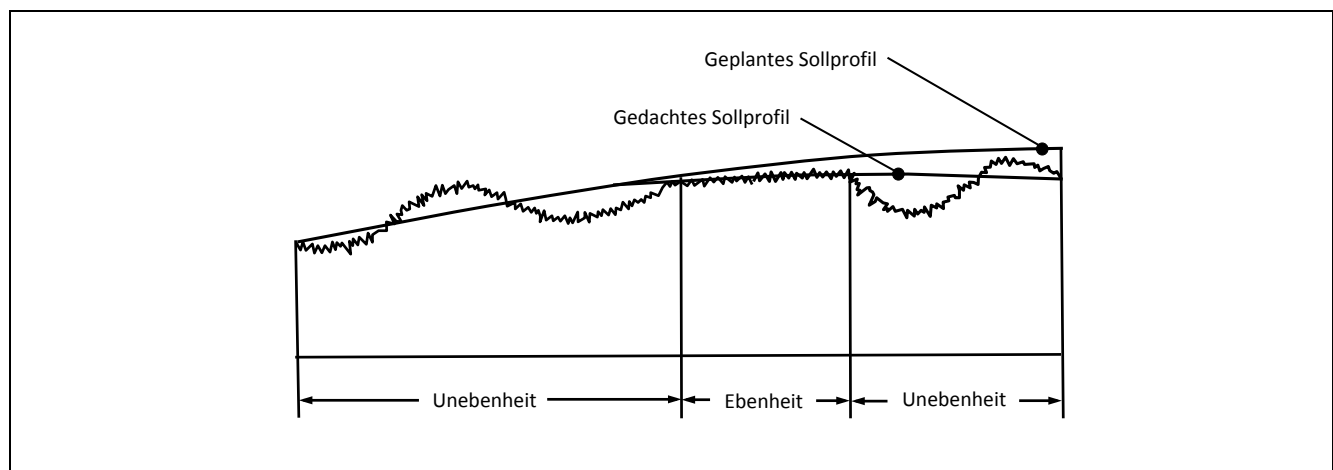


Abbildung 4: Ebenheit bzw. Unebenheit [FGSV 1976a]

Die Beschreibung der Ebenheit wird unterteilt in **Unebenheiten im Längsprofil**, die sich in Form von Wellen wiederfinden und **Unebenheiten im Querprofil**, die in Form von Spurrinnen Ausprägung finden. Des Weiteren sind vereinzelt unsystematische Unebenheiten als gleichzeitig auftretende Profilabweichungen in Längs- und Querrichtung zu beobachten. Sie ist anhand des Wellenlängenbereichs zwischen 0,5 m und 50 m charakterisiert (vgl. Abbildung 5) [Stöckert et al. 2014]. Damit deckt sie den Wellenlängenbereich oberhalb der Rauheit und unterhalb des trassierungsbasierten Längsprofils ab.

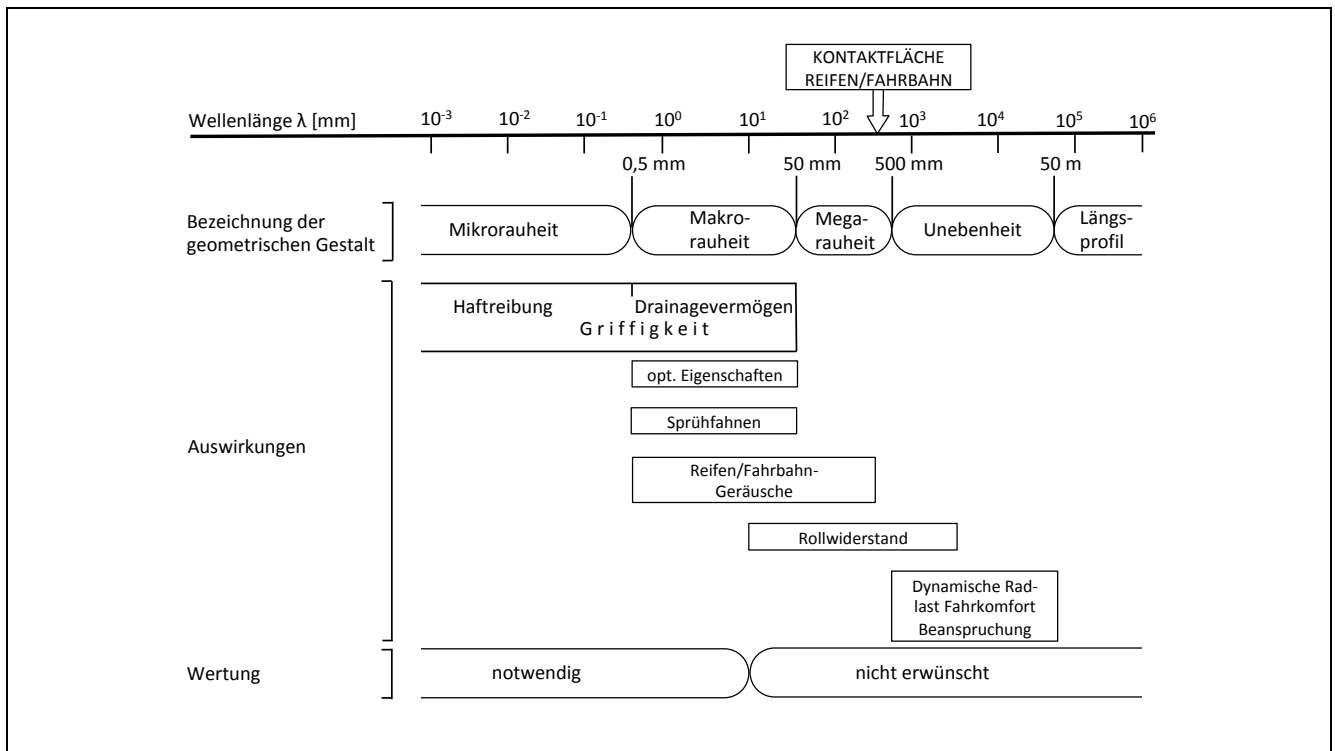


Abbildung 5: Einteilung einer Fahrbahnoberfläche nach Wellenlängen [Huscek 1997]

Die Ursachen für Unebenheiten können sowohl in der Art und Weise der Oberbauherstellung als auch in der Beanspruchung der Straße durch verkehrliche und klimatische Einflüsse begründet liegen. Geringe Unregelmäßigkeiten in der Ebenheit können während des Einbaus und der Verdichtung der einzelnen Oberbauschichten entstehen. Größere Unebenheiten resultieren meist aus im Handeinbau hergestellten Flächen oder der Wiederherstellung von Grabungen. Einen wesentlichen Einflussfaktor auf herstellungsbedingte Unebenheiten stellen ungleichmäßige Mischguttemperaturen dar, die zu ungleichmäßigen Abkühlungen innerhalb des Mischgutes oder wechselnden Schichtdicken infolge einer ungleichmäßigen Verdichtung führen. Beanspruchungen der Straßenoberfläche durch Verkehrsbelastung entstehen durch Verschleiß und Verformung [Schmuck 1987b]. Hinsichtlich der Beschreibung von bleibenden Verformungen ist zwischen mehreren Ausprägungsarten zu differenzieren (vgl. Abbildung 6).

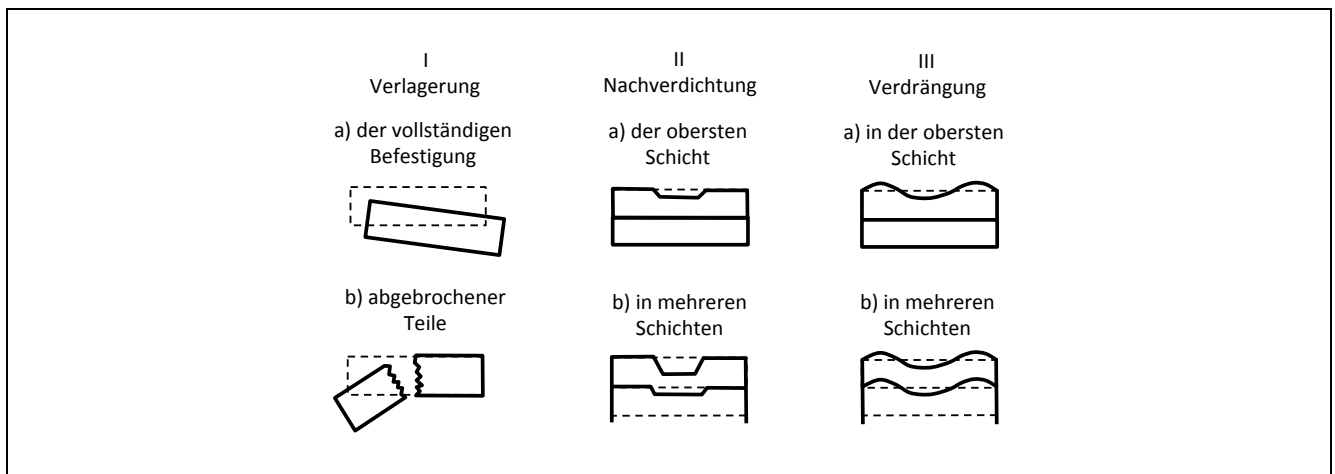


Abbildung 6: Ausprägungsarten bei bleibenden Verformungen [FGSV 1976b]

Unebenheiten der Fahrbahn in Längsrichtung führen beim Überfahren zu einer Schwingungserregung des Fahrzeugs in einem weiten Frequenzbereich. Für die Beschreibung der Fahrbahnoberfläche in Längsrichtung kann ein lotrechter Schnitt durch die Fahrbahn gelegt werden. Diese stochastisch zu beschreibende Kurve wird als Höhenprofil bezeichnet. Eine weitverbreitete Möglichkeit zur Beschreibung dieser Kurve ist die Verwendung von Häufigkeitsverteilungen zu den auftretenden Wellenlängen und Amplituden [Wehner et al. 1979]. Die Erfassung und Bewertung der Ebenheit einer Straßenoberfläche erfolgt getrennt nach Längs- und Querebenheit [Ueckermann 2002].

### Ebenheit im Längsprofil

Die Längsunebenheit ist die Abweichung des Längsprofils von einer Bezugslinie in einem Wellenlängenbereich von bis zu 100 m (vgl. Abbildung 7). Die Ebenheit im Längsprofil wirkt direkt auf die Erhaltungsziele Verkehrssicherheit, Befahrbarkeit und Substanzerhaltung [Bühler et al. 2002]. Nach Wehner et al. [1979] lassen sich völlig ebene Straßenoberflächen im Sinne einer großflächigen Ähnlichkeit von Ist- und Solloberfläche aus technischen Gründen auch bei größter Sorgfalt des Einbaupersonals nicht herstellen. Unebenheiten in Längsrichtung entstehen bereits durch den Einbauprozess einer Straßenbefestigung. Sie sind durch Inhomogenität der verwendeten natürlichen Baustoffe sowie Schwankungen in der Einbauqualität bedingt [Straube, Beckedahl 2000]. Innerhalb des Nutzungszeitraums einer Straße wird sich die Ebenheit anschließend stetig verschlechtern bis sie einen verkehrssicheren Gebrauch des Straßenabschnittes nicht mehr gewährleisten kann [Wehner et al. 1979].

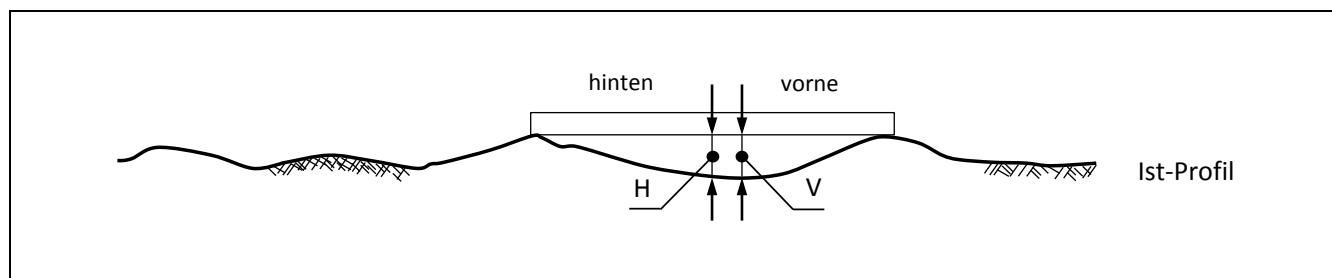


Abbildung 7: Unebenheiten im Längsprofil in bituminösen Straßenbefestigungen [Schmuck 1987b]

Die Längsebenheit wirkt sich maßgeblich auf den Fahrkomfort aus, der durch die Vertikalbeschleunigungen am Sitz bestimmt ist [Braun 1966; Wehner et al. 1979]. Oszillierende Abweichungen von der Soll-Oberfläche bewirken dynamische Kräfte, die das Fahrzeug, dessen Insassen und das Ladegut in Schwingungen versetzen sowie zu zusätzlichen Belastungen der Straße führen [Wehner et al. 1979]. Unebenheiten bewirken während der Befahrung der Straße im Fahrzeug Schwingungsanregungen, eine Beeinflussung des Fahrkurses, einen Kraftstoffmehrverbrauch durch steigenden Rollwiderstand sowie wachsende Geräusch- und Erschütterungs-Emissionen [Braun, Liesner, Gerz, Ohnemüller, Altdorfer, Sulten, Hellenbroich 1985].

Nach Gerlach, Beckedahl, Köhler, Arand, Dörschlag und Lorenzl [1994] kann die Ursache zur Entstehung von Längsunebenheiten in einer Vielzahl von Faktoren begründet liegen, wie z. B. ein geringer Widerstand des Asphaltmischguts gegen bleibende Verformungen, ein fehlender oder teilweise gelöster Schichtenverbund, Inhomogenität der Schichten, andere bereits aufgetretene Oberflächenschäden, eine mangelhafte Ausführung von Unterhaltungsarbeiten, Absenkungen im Fahrbahnrandbereich oder die Auswirkungen von durchgeführten Aufgrabungen.

---

Zur Beurteilung der Längsebenheit werden in der Regel Amplituden und Wellenlängen ermittelt, die für die beanspruchungsrelevanten Radlastschwankungen relevant sind [Schmuck 1987b]. Dazu wird das Zustandsmerkmal **Allgemeine Unebenheit** im Rahmen der ZEB erfasst. Dieses ist ein Zustandsmerkmal der Merkmalsgruppe Ebenheit im Längsprofil, welches durch das Unebenheitsmaß beschrieben wird [AP 9/C2 1985]. Als Maß für die Auswirkungen der Längsunebenheit auf die Straßennutzer wird die spektrale Dichte der Unebenheiten verwendet [Wehner et al. 1979]. Diese ist der integrale Wert der Quadrate der Amplituden einer bestimmten Wellenlänge [Schmuck 1987b]. Durch das Auftragen der spektralen Dichten über den zugehörigen Wellenlängen erhält man schließlich ein Unebenheitsspektrum. Mit Hilfe des Zustandsmerkmals Allgemeine Unebenheiten können regellose Längsunebenheiten zum Großteil mit einer hinreichenden Genauigkeit charakterisiert werden. Eine Beschreibung von periodisch wiederkehrenden Unebenheiten sowie Einzelhindernissen ist jedoch durch die auf geometrischen Berechnungen basierende Bewertung nur unzureichend möglich [Komma 2004]. Daher wurde von Ueckermann [2002] ein alternatives Bewertungskriterium für die Längsunebenheit entwickelt.

Der Längsebenheitswirkindex (LWI) ist eine aus dem Höhenlängsprofil abgeleitete Wirkgröße, die die Auswirkungen der Unebenheiten auf Fahrer, Ladung und Fahrbahn beschreibt. Diese Auswirkungen werden mit Hilfe verschiedener Verfahren gewichtet [Socina 2007]. Der jeweils größte und dadurch maßgebende Wert wird hierbei als Zustandsgröße verwendet [Ueckermann 2002]. Mit Hilfe des LWI lassen sich periodische Unebenheiten und Einzelhindernisse, wie z. B. Versätze an Betonplatten, im Vergleich zu der Zustandsgröße AUN besser abbilden. Derzeit wird die Zustandsgröße LWI noch nicht in das Bewertungsverfahren der ZEB integriert, sondern lediglich als zusätzlicher Zustandsindikator aufgenommen [Iwojlow 2014].

Ein weiteres Zustandsmerkmal der Merkmalsgruppe Ebenheit im Längsprofil ist das bewertete Längsprofil (BLP). Dieses wird durch die Zustandsgrößen Spannweite (DBL) und Standardabweichung (SBL) beschrieben. Es handelt sich hierbei um ein modifiziertes Höhenlängsprofil, welches durch Filterung und Gewichtung die Längsunebenheit charakterisiert [Maerschalk, Ueckermann, Heller 2011]. Ein geeignetes Auswerteverfahren für das BLP wurde im Rahmen einer Forschungsarbeit erarbeitet, sodass dessen zukünftige Integration in die ZEB nach Maerschalk, Ueckermann und Heller [2011] denkbar ist.

### **Ebenheit im Querprofil**

Das Zustandsmerkmal Ebenheit im Querprofil ist ebenfalls eine bedeutsame Eigenschaft einer Fahrbahnoberfläche und im Hinblick auf eine Bewertung und Prognose des Fahrbahnzustandes von großer Bedeutung [AP 9/D 1990]. Die Unebenheiten im Querprofil können zur Bewertung des Straßenzustandes in Hinblick auf die Erhaltungsziele Verkehrssicherheit, Befahrbarkeit, Substanzerhalt und die Minimierung zustandsbedingter Beeinträchtigungen für die Umwelt und für Dritte genutzt werden [RPE-Stra 01]. Die Kennzeichnung und Bewertung der Unebenheiten im Querprofil orientiert sich an der Notwendigkeit, Aussagen über die Wirkungen und Ursachen dieser Unebenheiten zu treffen [Braun et al. 1985].

Unebenheiten im Querprofil werden als **Spurrinnen** bezeichnet und resultieren aus durch Verkehrsbelastung hervorgerufene Verformungen, die bei Entlastung nicht vollständig zurückgebildet werden [Gerlach et al. 1994; Straube, Beckedahl 2000]. Insbesondere Straßenoberflächen in Asphaltbauweise können dazu neigen, im Verlauf der Nutzungsdauer aufgrund des Einflusses der Verkehrsbeanspruchung Spurrinnen auszubilden. Mit zunehmender Spurrinnentiefe und -breite kann für den leichteren



und schnellen Verkehr die Gefahr einer Gleisbildung entstehen [Wehner et al. 1979], die zu einer deutlichen Erhöhung des Unfallrisikos vor allem bei Zweiradfahrern führt.

Sie wirken sich direkt negativ auf das Gebrauchsverhalten und die Verkehrssicherheit der Nutzer aus. Des Weiteren können sie je nach Schadensausprägung Hinweise auf eventuelle Verformungen der unteren Schichten liefern. Sie beeinflussen das Lenkverhalten der Verkehrsteilnehmer und verstärken bei starker Ausprägung das „Spurfahren“ innerhalb eines Fahrstreifens. Im Hinblick auf die Verkehrssicherheit stellen sie bei Nässe insbesondere für Krafttradfahrer ein Sicherheitsrisiko dar, wenn es aufgrund unzureichender Entwässerung der Fahrbahn in Querrichtung zu Aquaplaning-Effekten kommt [Wehner et al. 1979; Komma 2004; Socina 2007]. Die Auswirkungen von Unebenheiten im Querprofil variieren in Abhängigkeit der vorhandenen Querneigung der Fahrbahn. Diese lassen sich nach Braun et al. [1985] in direkte Beeinträchtigungen des Fahrverhaltens der Fahrzeuge auf trockener und nasser Fahrbahn sowie Beeinträchtigungen des Wasserabflusses von der Fahrbahnoberfläche unterteilen. Durch letztere werden das Kraftschlussverhalten zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahnoberfläche beeinflusst. Ausführliche Untersuchungen [Braun, Laermann, Liesner 1983] zur Beeinträchtigung des Fahrzeugverhaltens infolge von Spurrinnen zeigen, dass die Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit auch bei trockener Fahrbahn durchaus beachtenswert sind [Braun et al. 1985].

Nach Buseck und Hürtgen [1987] sind die an der Fahrbahnoberfläche als bleibende Verformungen anzutreffenden Spurrinnen das Ergebnis der bleibenden Verformungen aller flexiblen Schichten des Oberbaus. Die unteren ungebundenen oder mit hydraulischen Bindemitteln gebundenen Tragschichten sowie der Unterbau/Untergrund weisen in der Regel keine Verformungen auf. Nach Straube und Beckedahl [2000] sind in der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht die größten Verformungen zu beobachten. Die Entstehung von Spurrinnen resultiert weniger aus der Nachverdichtung durch den Verkehr. Die Ursache für eine Verformung sind oftmals Fließvorgänge im Asphalt. Mit zunehmender Anzahl an erfolgten Lastübergängen über eine Asphaltbefestigung verläuft der Zuwachs an bleibenden Verformungen degressiv [Buseck, Hürtgen 1987].

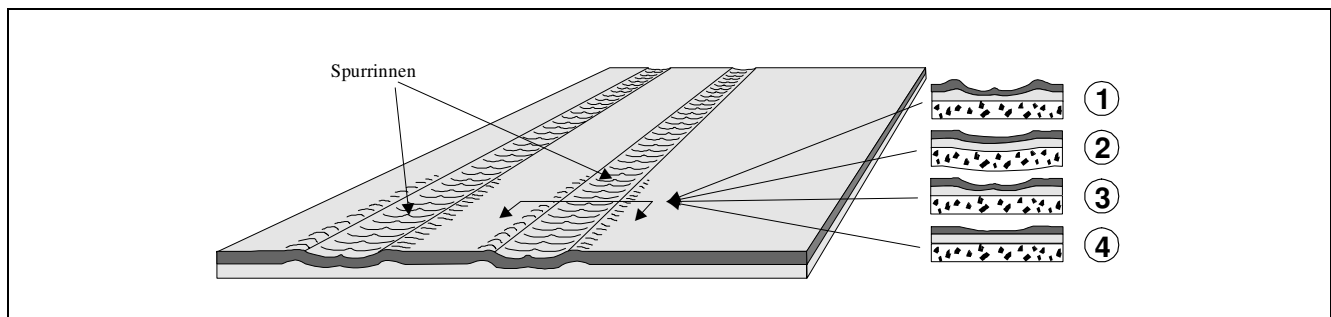


Abbildung 8: Unebenheiten in Querrichtung (Spurrinnen) in bituminösen Straßenbefestigungen [Krause 2001]

Die geometrische Form von Spurrinnen kann ein Indikator für mögliche Schadensursachen sein. Eine ausgeprägte Spurrinnentiefe kann z. B. auf eine mangelhafte Bauausführung oder einen nicht ausreichend dimensionierten Oberbau hinweisen. Tiefe Spurrinnen deuten auf ein eher spurgebundenes Fahrverhalten hin, während flache oder nicht vorhandene Spurrinnen ein Indikator für eine gleichmäßige Nutzung der Fahrstreifenbreite gesehen werden können [Komma 2004]. Aufgrund von Unebenheiten in Querrichtung kommt es zusätzlich zu einem verminderten Abfluss von Niederschlagswasser, was einen verminderten Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn bewirkt [Iwojlow

2014]. Für die Bewertung der Ebenheit im Querprofil werden verschiedene Kenngrößen, wie die Profiltiefe, die Spurrinnentiefe und die fiktive Wassertiefe, ermittelt (vgl. Abbildung 9)

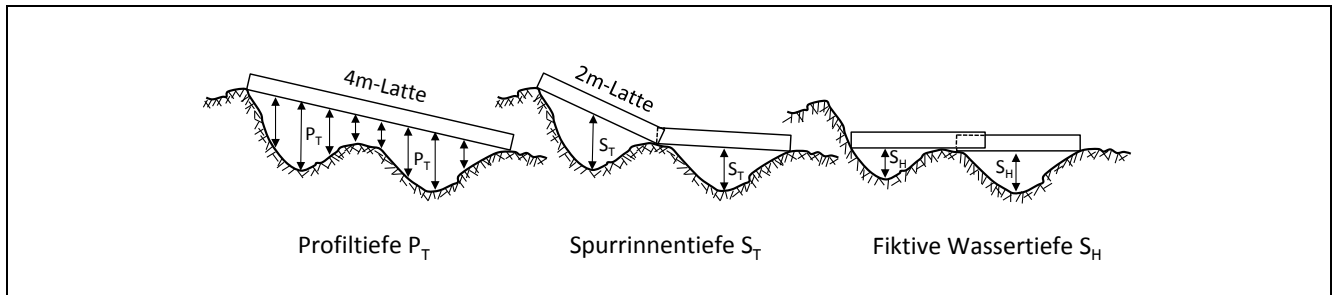


Abbildung 9: Ermittlung von Indikatoren der Querebenheit mit der Richtlatte [Schmuck 1987b]

## Rauheit

Neben der Ebenheit zählt die Rauheit zu den wichtigsten Merkmalen einer Straßenoberfläche [Wehner et al. 1979], da sie wesentlich die Verkehrssicherheit bei Nässe beeinflusst [Schulze 1975; Huschek 1995; Bald, Lutz, Weidich 2004; Franke 2004]. Die **Griffigkeit** kennzeichnet die Wirkung der Textur (Rauheit) und der stofflichen Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche auf den möglichen Kraftschluss zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn unter festgelegten Bedingungen [TP Griff-StB (SKM) 2007]. Sie ist das Zustandsmerkmal der Merkmalsgruppe Rauheit [TP Griff-StB 2001] und wird seit 1991 im Rahmen der ZEB auf Bundesfernstraßen erfasst [Stöckert et al. 2014]. Sie wird als sekundäre Oberflächeneigenschaft bezeichnet, da, neben der Rauheit der Fahrbahnoberfläche, zusätzlich die Eigenschaften des Fahrzeugreifens den zu Stande kommenden Kraftschluss maßgeblich beeinflussen. Die Griffigkeit ist für den Nutzer bzw. den Fahrer nicht spürbar, solange der Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn besteht, d. h. die Spurhaltung und das Antriebs- und Bremsvermögen gewährleistet sind [Gerlach et al. 1994].

Die Griffigkeit ist eine bedeutende Oberflächeneigenschaft einer Verkehrsfläche und wird im Wesentlichen von dem Zustand der Fahrbahnoberfläche mit ihren Materialeigenschaften sowie durch Zwischenmedien, wie z. B. Wasserfilm und Verschmutzungen bestimmt [Rosauer, Buscham, Blumenfeld 2017]. Die Oberflächenrauheit einer Straße zählt zu den nutzerrelevanten Gebrauchseigenschaften [TP Griff-StB (SKM) 2007]. Für die Charakterisierung der Griffigkeit sind die Makro- und Mikrorauheit sowie die Nettofläche, die für den Reifen-Fahrbahn-Kontakt verfügbar ist, relevant. Eine ausgeprägte Makrorauheit sorgt für eine ausreichende Entwässerung der Oberfläche, sodass ein Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn entsteht. Die Mikrorauheit bewirkt die eigentliche Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche. Des Weiteren beeinflusst zusätzlich die Nettoaufstandsfläche des Reifens den Kraftschluss.

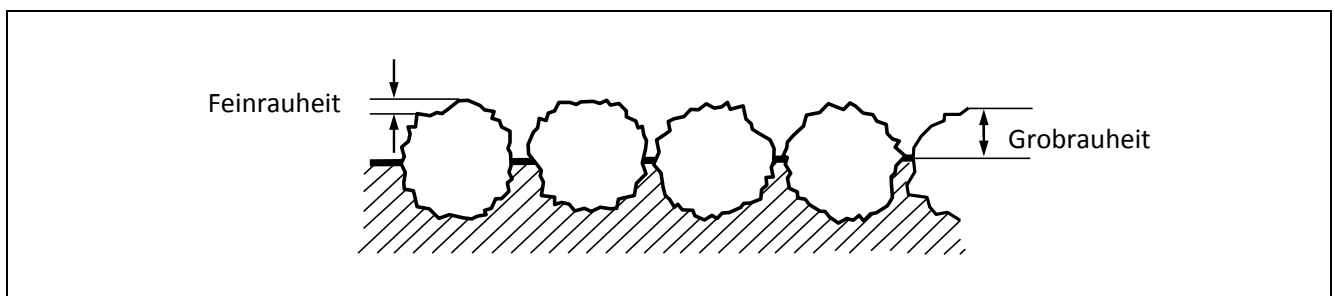


Abbildung 10: Charakterisierung der Griffigkeit mittels Makro- und Mikrorauheit [Schmuck 1987b]

---

Die Rauheit einer Fahrbahnoberfläche wird anhand des Schärfegrads und des Profils der Straßenoberfläche beurteilt. Die Grob- und Makrotextur wird im Wesentlichen durch die Eigenschaften des Asphaltmischguts sowie des Abnutzungsgrades der Deckschicht bestimmt [Straube, Beckedahl 2000]. Sie ist vor allem durch die Kornzwischenräume, die bei nasser Fahrbahn eine Drainagewirkung bezüglich des Oberflächenwassers am Fahrzeugreifen ausüben, geprägt. Die Makrotextur ist daher durch die Größe und Anordnung der an der Fahrbahnoberfläche befindlichen Mineralstoffkörner charakterisiert [Gerlach et al. 1994].

Die Mikrotextur variiert in Abhängigkeit der Beschaffenheit der Kornoberfläche sowie dem Widerstand gegen Polieren [Straube, Beckedahl 2000]. Für Geschwindigkeiten bis zu 50 km/h wird der Reibwert insbesondere durch die Mikrotextur geprägt, während bei höheren Geschwindigkeiten von etwa 80 km/h der Einfluss der Makrotextur dominiert. Mit zunehmender Liegezeit und Verkehrsbeanspruchung werden die Gesteinskörner zunehmend poliert, sodass das Griffigniveau sinkt. Der Kraftschluss zwischen der Straßenoberfläche und einem Reifen stellt die Überlagerung von sehr komplexen, physikalischen Vorgängen dar, die anhand von Einflussgrößen, wie z. B. der Fahrbahntextur, Reifenprofil, Temperatur, Witterungsverhältnisse, Fahrzeuggeschwindigkeit und Schlupf beschrieben werden [Socina 2007]. Bisher existieren keine zufriedenstellenden Modelle, um auf Basis der Oberflächentextur die Griffignigkeit einer Straße abzuschätzen bzw. zu prognostizieren. Die Griffignigkeit wird daher derzeit in Deutschland anhand eines Reibungsbeiwertes an der Straßenoberfläche mit Hilfe von schnellfahrenden Messsystemen erfasst.

### **Substanzmerkmale (Oberfläche)**

Um Aussagen zur Schädigung und Zerstörung der Substanz einer Straße treffen zu können, werden die Substanzmerkmale (Oberfläche) erfasst und ausgewertet [Gerlach et al. 1994; Löcherer 2015]. Die Substanzmerkmale der Oberfläche einer Asphaltdeckschicht können in Anlehnung an die ZTV ZEB-StB [2006] in die folgenden Kategorien eingeteilt werden:

- Risse: Netzzrisse, Risshäufungen, Einzelrisse
- Ausbrüche
- Offene Arbeitsnähte
- Bindemittel- und Mörtelanreicherungen

Die Schadensmerkmale an der Oberfläche führen nicht zwangsläufig zu einer Minderung des Gebrauchswertes der Straßenbefestigung. Sie erfordern jedoch in der Regel bauliche Erhaltungsmaßnahmen, um eine weitere Ausprägung dieser Schäden und damit eine eventuelle nachfolgende Gebrauchswertminderung zu unterbinden [Schmuck 1987b]. Bei der Bewertung von Substanzmerkmalen wird in Deutschland nach Asphalt- und Betonoberflächen unterschieden [Socina 2007].

### **Risse**

Für eine Beschreibung der strukturellen Beschaffenheit einer Straßenbefestigung anhand von Oberflächenmerkmalen wird u. a. das Zustandsmerkmal Risse verwendet [Weninger-Vycudil et al. 2009]. Risse werden nach Einzelrisen, Netzzrisen und Risshäufungen in der Deckschicht differenziert [Straube, Beckedahl 2000] (vgl. Abbildung 11).

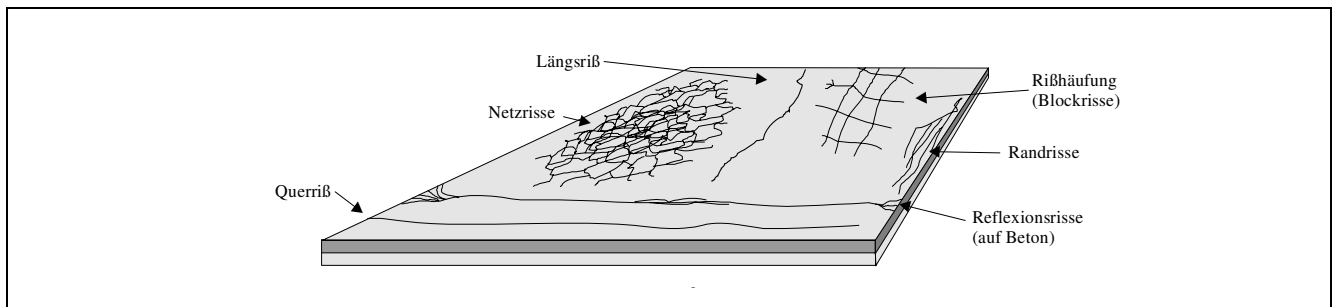


Abbildung 11: Rissbilder in bituminösen Straßenbefestigungen [Krause 2001]

Die Entstehung von Rissen kann durch sehr unterschiedliche Ursachen hervorgerufen werden. Unterschieden wird in der Rissbildung durch Ermüdung infolge von tiefen Temperaturen, Reflexionsrissbildung und herstellungsbedingte Rissbildung. Im Wesentlichen ist die Entstehung von Rissen durch eine Überschreitung der Tragfähigkeit der Asphaltbefestigung oder durch thermisch induzierte Spannungen bedingt. Beide Schadensursachen werden durch die Überlagerung von Einflüssen der Liegezeit sowie der Ermüdung der eingebauten Materialien verstärkt [Rosauer 2010]. Nach Schmuck [1987b] und Maerschalk [1997] treten Rissbilder erst nach einer längeren Liegezeit unter hoher Verkehrsbelastung auf, sodass der Verlauf der Schadensentwicklung oftmals mittels einer Exponentialfunktion abgebildet wird. Neben dem Rissbild sind weitere Oberflächenschäden an Asphaltbefestigungen zu nennen. Hierunter zählen Flickstellen, Ausmagerungen, Splittverluste, Abrieb bzw. Verschleißerscheinungen und Bindemittelanreicherungen (vgl. Abbildung 12).

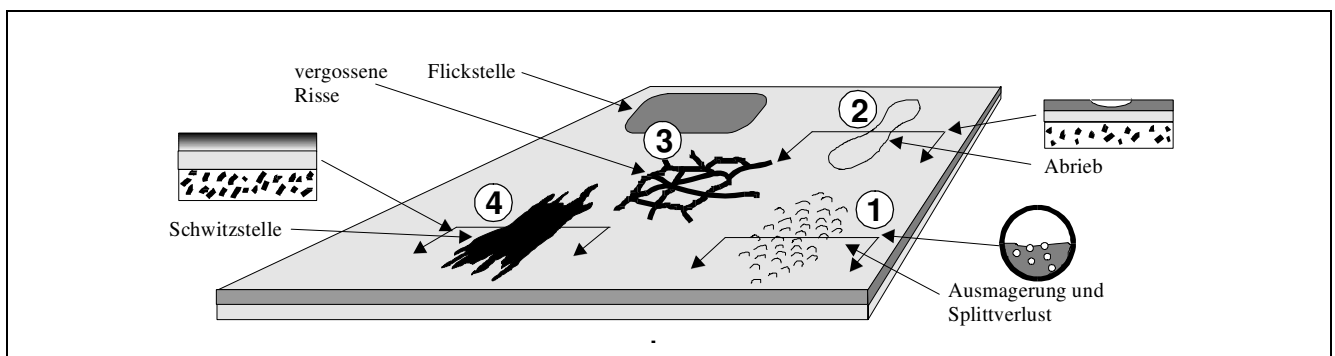


Abbildung 12: Oberflächenschäden in bituminösen Straßenbefestigungen [Krause 2001]

### Ausmagerungen / Abrieb / Verschleiß

Verschleißerscheinungen können nach Schmuck [1987b] in mehrere Kategorien unterteilt werden. Substanzverluste mit Porosität der Oberfläche sind sehr raue, durch Mörtel- und Splittverlust gekennzeichnete Straßenoberflächen, deren Splittkörner keine ausreichende Einbindung in die Asphaltoberfläche aufweisen. Durch Verkehrsbelastung werden einzelne Splittkörner aus dem Verbund herausgelöst, sodass Oberflächenwasser in diese Stellen eintreten kann und den Belag zunehmend schädigt. Oberflächenschäden in Form von Abrieb entstehen, wenn Feinanteile aus einer Asphaltdeckschicht durch mechanische Beanspruchung herausgebrochen werden. Dieser Substanzverlust ist insbesondere in den Rollspuren der Fahrstreifen vorzufinden und wird durch den Einfluss der Witterung verstärkt. Ausbrüche sind örtlich begrenzte Materialverluste in einer oder mehreren Schichten,

die durch eine erhöhte mechanische Beanspruchung, Frosteinwirkung, Einbaufehler oder einen mangelnden Schichtenverbund verursacht werden können [Schmuck, Oefner, Rezanka 1985].

### Bindemittel- und Mörtelanreicherungen

Bindemittel- und Mörtelanreicherungen, die auch als Schwitzstellen bezeichnet werden, sind durch glänzende, flecken- und streifenförmige Oberflächen zu erkennen und weisen meist eine verminderte Griffigkeit auf. Mögliche Ursachen für diese Art von Oberflächenschaden können eine fehlerhafte Mischgutzusammensetzung mit einem zu hohen Bindemittelgehalt, eine erhöhte Verkehrsbeanspruchung als bei der Mischgutzusammensetzung vorgesehen oder eine zu frühe Verkehrsfreigabe sein [Schmuck 1987b].

#### 2.6.2.3 Zustandserfassung

Die zuvor beschriebenen Zustandsmerkmale werden auf den Bundesfernstraßen in Deutschland mit Hilfe von schnellfahrenden Messsystemen erfasst [Bühler et al. 2002]. Anhand der erfassten Geometrie und hochaufgelösten Fotoaufnahmen werden Zustandsgrößen ermittelt.

Im Nachfolgenden werden einige Informationen zur Messtechnik und Vorgehensweise zur Berechnung der Zustandsgrößen innerhalb der Teilprojekte 1 bis 3 (Ebenheit im Längs- und Querprofil, Griffigkeit und Substanzmerkmale (Oberfläche)) dargelegt.

#### Teilprojekt 1a: Ebenheit im Längsprofil

Im Rahmen des Teilprojektes 1a wird die Längsebenheit mit Hilfe von längs zur Fahrtrichtung aufgenommenen Profilschnitten in der rechten Rollspur erfasst. Die jeweils in einem lateralen Abstand von 10 cm gemessenen Abstände zur Fahrbahnoberfläche werden miteinander verknüpft und zu einem Längsprofil verrechnet [ZTV ZEB-StB 2006]. Die Erfassung der Profilschnitte erfolgt mit Einzel- oder Mehrfachabtastungssystemen, die Ultraschall-, Laser- oder Infrarotsensoren beinhalten. Bei der Einzelabtastung wird eine einzige Sonde eingesetzt, die einer Inertial-Referenzlinie folgt. Die Mehrfachabtastung kombiniert in der Regel vier Abstandssensoren (vgl. Abbildung 13), die an einem starren Balken mit einer Länge von 2 m oder 4 m montiert sind [Komma 2004], wodurch diese Systeme über eine höhere Präzision verfügen. Während der Erfassung werden sogenannte Spurführungssysteme verwendet, die dem Fahrer helfen, über die gesamte Messtrecke einen gleichmäßigen Abstand zur Fahrstreifenmarkierung zu realisieren [Socina 2007]. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es möglich, die für die Längsebenheit bewertungsrelevanten Wellenlängen der Fahrbahnoberfläche zwischen 0,5 m und 50 m zu erfassen.

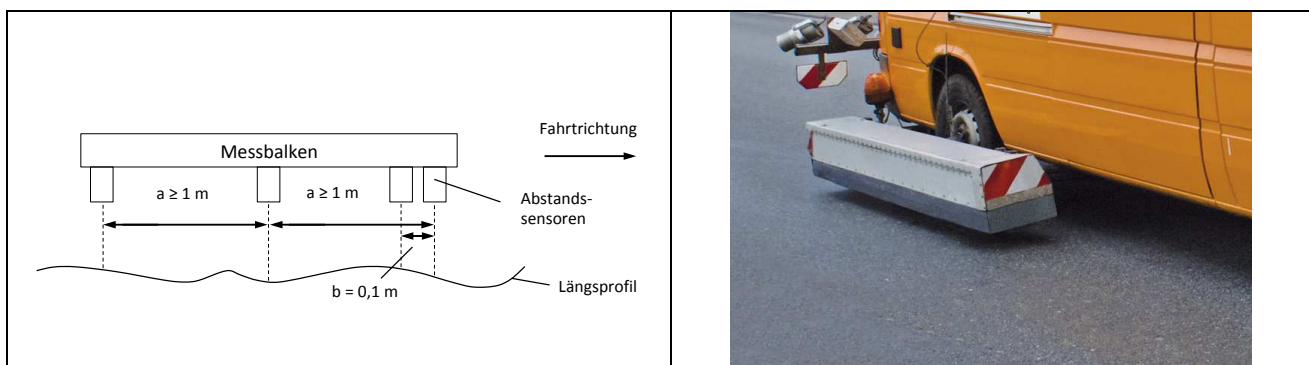


Abbildung 13: Messprinzip Längsebenheit [ZTV ZEB-StB 2006] (links); Messsystem ARGUS [Lehmann+Partner GmbH 2018] (rechts)

Die Berechnung der Zustandsgröße **AUN (Allgemeine Unebenheiten)** erfolgt durch eine Kombination mehrerer mathematischer Verfahren, wie z. B. der Glättung der Daten mittels gleitendem Mittelwert, Auswertung des Frequenzspektrums komplexer Zahlen mittels einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) sowie der Berechnung der „Spektralen Dichte der Leistung“ [Socina 2007]. Als Spektrale Dichte der Unebenheit wird das Quadrat der Amplituden einer bestimmten Wellenlänge bezeichnet. Die Abbildung der Spektralen Dichten der Unebenheiten in Abhängigkeit der zugehörigen Wellenlängen oder Wegkreisfrequenzen ergibt ein Unebenheitsspektrum [Straube, Beckedahl 2000]. Der Verlauf der Spektraldichte lässt sich nach Mitschke [1972] anhand eines logarithmierten und dadurch linearen Zusammenhangs mit der Wegfrequenz beschreiben. Die Steigung der Geraden wird hierbei als Welligkeit bezeichnet [Wehner et al. 1979; Straube, Beckedahl 2000]. Das charakteristische Unebenheitsmaß wird bei einer Wegkreisfrequenz von 1 bestimmt [Straube, Beckedahl 2000].

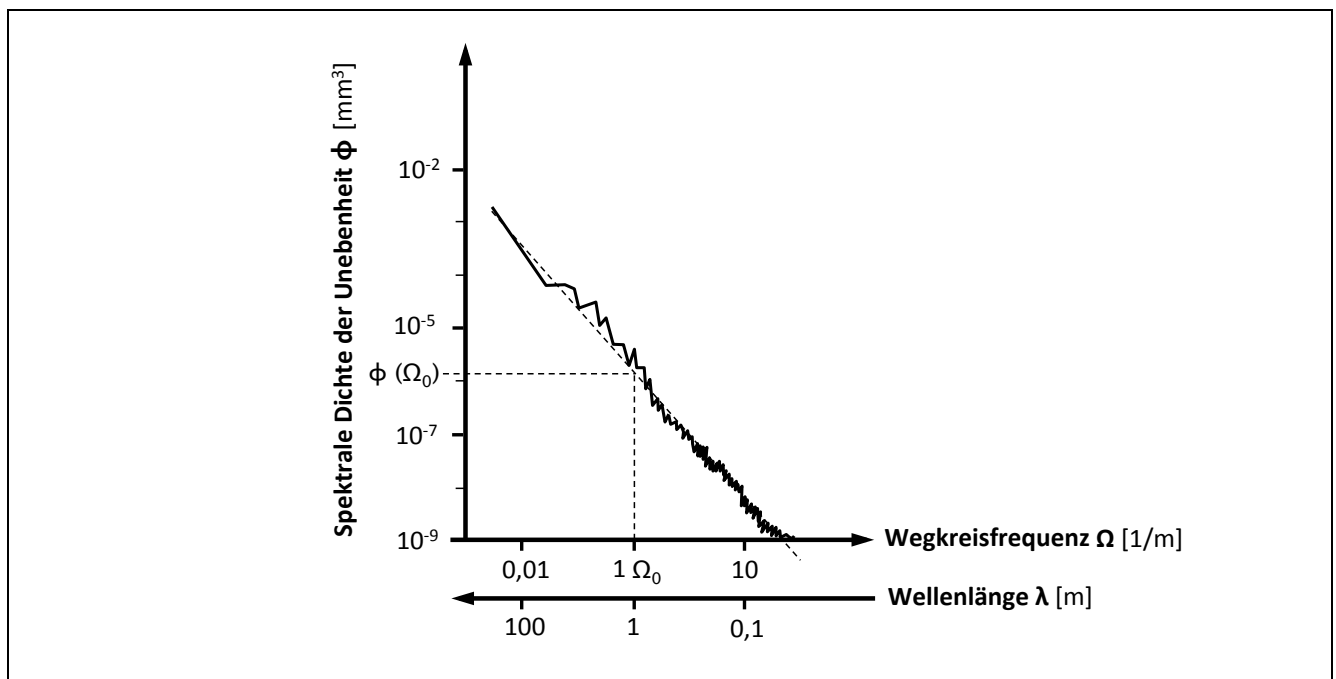


Abbildung 14: Beispielhafte Darstellung eines Unebenheitsspektrums [AP 9/C2 1985]

Für die Berechnung der Zustandsgröße **LWI (Längsebenheitswirkindex)** wird aus dem erfassten Höhenprofil zunächst mit einer FFT das Frequenzspektrum, d. h. die vorhandenen Wellenlängen und Amplituden, ausgewertet. Mit Hilfe des mathematischen Verfahrens des „Decolouring“ wird das gewonnene Frequenzspektrum „entfärbt“ und durch eine inverse Fourier-Transformation (iFFT) in ein Höhenprofil zurücktransformiert. Anschließend erfolgt eine mathematische Faltung des zurückgerechneten Profils mit Filtern für die Komponenten Mensch, Ladung und Rad. Die verwendeten Filter bilden die Wirkung von Unebenheiten auf die jeweiligen Komponenten aus. Aus der Faltung resultierende Filterantworten werden danach mit Kalibrierungsfunktionen angeglichen und untereinander verglichen. Die Zustandsgröße LWI berechnet sich schließlich aus dem Maximalwert dieser drei Ergebnisse und gibt die Wirkung von Längsunebenheiten auf genormte Fahrzeugmodelle wieder [Socina 2007]. Er stellt damit eine vergleichbare Größe zu dem international verwendeten „International Roughness Index“ (IRI) dar und ist eine Ergänzung zu der national verwendeten Zustandsgröße AUN.

## Teilprojekt 1b: Ebenheit im Querprofil

Die Ebenheit im Querprofil wird anhand von Querprofilen der Fahrbahnoberfläche erfasst. Dazu wird in regelmäßigen Abständen ein Querprofil mit Hilfe von Lasersensoren abgetastet [Socina 2007]. Zur Erfassung der Ebenheit im Querprofil kommen Messsysteme mit Laser-, Infrarot- und Ultraschallsensoren zur relativen Abstandsmessung zwischen Messfahrzeug und Fahrbahnoberfläche zum Einsatz [Straube, Beckedahl 2000]. Die berührungsfreien Lasermessverfahren unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich ihrer Anordnung der Sensoren – senkrecht oder schräg positioniert zur Fahrtrichtung [Socina 2007].

Die verwendeten Lasersensoren arbeiten nach dem Triangulationsverfahren und ermöglichen eine schnelle, exakte sowie objektive Datenerfassung. Die ZTV ZEB-StB [2006] fordern einen Messpunktabstand in Längsrichtung für die einzelnen Querprofile von 1 m [Komma 2004, Stöckert et al. 2014]. Die Messpunktabstände innerhalb eines Querprofils sollen maximal 0,1 m betragen, sodass die geforderte Messbreite der Querprofile von 3,20 m auf Bundesautobahnen mit einem mit 33 Lasersensoren ausgestatteten Messbalken erfolgt [ZTV ZEB-StB 2006] (vgl. Abbildung 15).

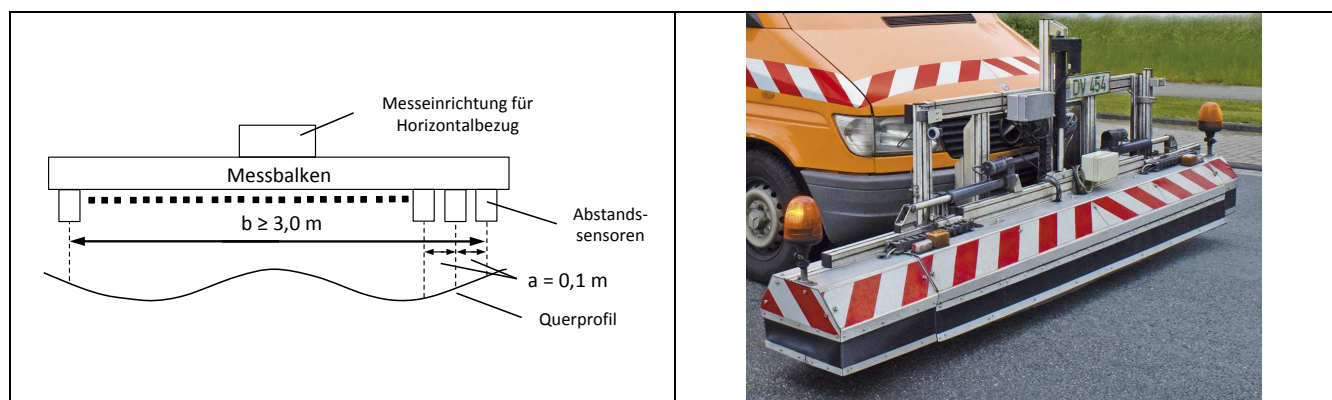


Abbildung 15: Messprinzip Querebenheit [ZTV ZEB-StB 2006] (links); Messsystem ARGUS [Lehmann+Partner GmbH 2018] (rechts)

Die Erfassung von Querprofilen der Straßenoberfläche kann nach zwei Messprinzipien erfolgen. Die berührungslose Einzelpunkt Abstandsmessung besteht aus mehreren Einzelpunktmessungen innerhalb eines Querprofils, die durch an einem Quermessbalken befestigte Ultraschall- oder Laserabstandsensoren erfasst werden. Hierbei wird der lotrechte Abstand zwischen Messbalken und Fahrbahnoberfläche gemessen. An den Rändern des Messbalkens sind zusätzlich weitere Sensoren schräg angeordnet, um die gesamte Fahrstreifenbreite zu erfassen. Anhand der mit Sensoren gemessenen Neigung des Messbalkens kann die Querneigung der Fahrbahn bestimmt werden.

Ein alternatives Messverfahren ist das Lichtschnittverfahren, bei dem ein Lichtstreifen vom Messfahrzeug auf die Fahrbahnoberfläche projiziert wird. Durch die verzerrte horizontale Projektion des Querprofils, die von Videokameras erfasst wird, kann anschließend das Querprofil extrahiert und rechnerisch entzerrt werden [AP 9/M2 2001].

Als Indikatoren für die Beschreibung der Querebenheit einer Fahrbahnbefestigung werden die Zustandsindikatoren **Spurrinnentiefe (SPT)** und **fiktive Wassertiefe (SPH)** erfasst. Die Spurrinnentiefe je Rollspur beschreibt das Stichmaß zwischen der Spurrinnensohle und einer Bezugslinie quer zur Straßenachse [Schmuck 1987b], welches im Rahmen einer softwaregestützten Modellierung anhand

einer fiktiven 2m-Latte jeweils in der linken (MSPTL) und rechten (MSPTR) Rollspur ermittelt wird (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 16). Hierbei wird die Querlatte über das Querprofil geschoben und für alle denkbaren Messpositionen der maximale vertikale Abstand zum Profilboden ermittelt (vgl. Tabelle 4). Je Querprofil wird sowohl für die linke als auch für die rechte Rollspur der Maximalwert bestimmt. Anschließend wird über den gesamten Auswerteabschnitt eine mittlere Spurrinnentiefe rechts und eine mittlere Spurrinnentiefe links bestimmt. Das Maximum aus linker und rechter mittlerer Spurrinnentiefe liefert die **mittlere Spurrinnentiefe (MSPT)** des Auswerteabschnitts.

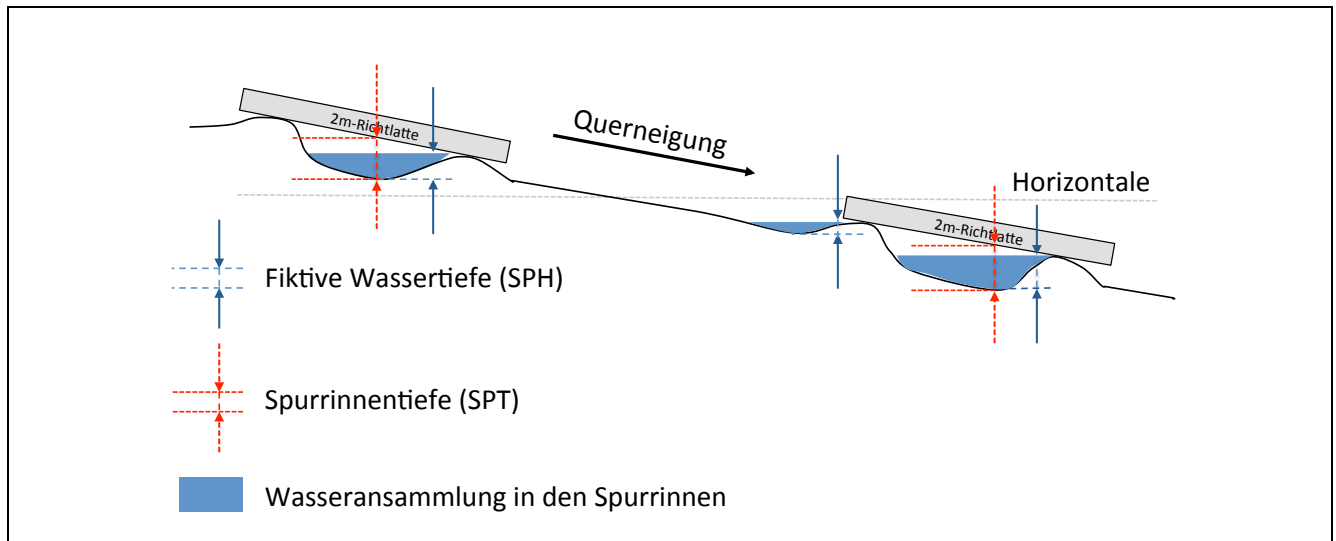


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Spurrinnentiefe (SPT) und der Fiktiven Wassertiefe (SPH) [nach DIN 13036-8]

Die **fiktive Wassertiefe (MSPH)** stellt die größte mögliche Wassertiefe eines Querprofils dar [Schmuck 1987b] und ist das größte Stichmaß unter einer durch den unteren relativen Hochpunkt einer Rollspur gelegten horizontalen Bezugslinie, ohne Berücksichtigung der Längsneigung [TP Eben – Berührende Messungen 2007]. Die MSPH wird aus dem Querprofil jeder Einzelmessung über einen 10-m-Abschnitt ermittelt unter Zugrundelegung der Mittelwerte des Querneigungsbezugs des Systems [ZTV ZEB-StB 2006]. Für die Ermittlung der MSPH wird, unter Berücksichtigung der Querneigung der Fahrbahn, die theoretisch mögliche Wassertiefe rechnerisch ermittelt, die sich innerhalb einer Spurrinne ansammelt. Der Abfluss in Längsrichtung wird hierbei vereinfachend nicht berücksichtigt [Socina 2007]. Analog zur Berechnung der Spurrinnentiefe werden die mittleren Fiktiven Wassertiefen in der linken und rechten Rollspur über den gesamten Auswerteabschnitt berechnet und anschließend das Maximum als MSPH angegeben [Weninger-Vycudil et al. 2009]. Die Trennung zwischen linker und rechter Rollspur erfolgt über die Mitte des Querprofils. Ein Einzelwert wird jeweils für 10 m zu einem Mittelwert berechnet. Die 10-m-Einzelwerte werden anschließend für einen 100-m-Abschnitt wiederum zu einem Mittelwert zusammengefasst [ZTV ZEB-StB 2006].



## Teilprojekt 2: Rauheit

Die Erfassung der Griffigkeit kann mit Hilfe von verschiedenen Messverfahren erfolgen [Schmuck 1987b]. Im Rahmen der ZEB werden mit schnellfahrenden und kontinuierlichen Messsystemen Reibkräfte zwischen einem Messreifen und der Fahrbahnoberfläche ermittelt [ZTV ZEB-StB 2006]. Analog zu den Messungen der Längsunebenheit wird die Griffigkeit in der rechten Rollspur erfasst, da dort durch die höchste Verkehrsbeanspruchung starke Poliervorgänge auf die Makro- und Mikrotextur der Fahrbahnoberfläche wirken [Weidich 2009].

Seit 2001 kommt in Deutschland für die netzweite Zustandserfassung der Griffigkeit ausschließlich das standardisierte Seitenkraftmessverfahren (SKM) zum Einsatz [ZTV ZEB-StB 2006; Löcherer 2015]. Es basiert auf dem Messprinzip eines sturzf freien und um 20° schräggestellten Messrades [Schmuck 1987b, Socina 2007, TP Griff-StB (SKM) 2007]. Dieses ist mit einem profillosen Messreifen ausgestattet und wird mit einer definierten Normalkraft in Höhe von 1.960 N auf die Fahrbahnoberfläche gedrückt [Stöckert et al. 2014]. Unter dieser Konfiguration ergibt sich ein Seitenschlupf von etwa 34 % [BASt 2018].

Während der Messfahrt wirken Kräfte zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche sowohl in Längs- als auch in orthogonaler Richtung zur Laufrichtung des Messrades. Die in Längsrichtung wirkenden Kräfte sind nahezu Null, da das Messrad frei rotieren kann. Die in Querrichtung wirkende Kraftkomponente wird mit Hilfe der am schräglaufenden Messrad in Richtung der Messradachse wirkenden Seitenreibungskraft beschrieben und durch eine Kraftmessdose erfasst [BASt 2018]. Aus dem Verhältnis zwischen gemessener Seitenreibungskraft ( $F_y$ ) und der aufgetragenen Normalkraft ( $F_z$ ) ergibt sich schließlich der Kraftschlussbeiwert am schräglaufenden Rad ( $\mu_y$ ) [TP Griff-StB (SKM) 2007] (vgl. Abbildung 17).



Abbildung 17: Formel zur Berechnung des Kraftschlussbeiwertes (links); Messvorrichtung des SKM (rechts) [TP Griff-StB (SKM) 2007]

Die Messung kann je nach Streckencharakteristik und örtlich zulässiger Höchstgeschwindigkeit mit unterschiedlichen Messgeschwindigkeiten (40, 60 und 80 km/h) erfolgen. In Abhängigkeit der gewählten Messgeschwindigkeit wird eine definierte Wassermenge über eine Benetzungsvorrichtung (Wasserschuh) dosiert auf die Fahrbahnoberfläche aufgebracht, sodass diese mit einer rechnerisch konstanten Wasserfilmdicke von 0,5 mm bedeckt ist [Rosauer et al. 2017].

Der gemessene **Seitenkraftbeiwert (GRI)** variiert in Abhängigkeit einer Vielzahl an Einflussgrößen, wie z. B. der Textur der Fahrbahnoberfläche, dem Schräglaufwinkel, den Eigenschaften des verwendeten Messreifens, der Messgeschwindigkeit, der Wasserfilmdicke, eventuellen Verunreinigungen und von den Temperaturen des Messreifens, des Annässungswassers, der Fahrbahnoberfläche sowie der Luft [TP Griff-StB (SKM) 2007]. Daher sind für Griffigkeitsmessungen an Fahrbahnoberflächen stets die äußeren Versuchsbedingungen eindeutig festzulegen und während den Messungen konstant zu halten [Schmuck 1987b]. Die Seitenkraftbeiwerte werden in einem Messpunktabstand in Längsrichtung von 1 m aufgezeichnet und anschließend geschwindigkeits- und temperaturkorrigiert [Socina 2007]. Dadurch werden die Messwerte, bezogen auf eine Soll-Messgeschwindigkeit und eine Bezugstemperatur der Fahrbahn sowie des Annässungswassers von jeweils 20 °C, vergleichbar. Die Bewertung der Griffigkeit erfolgt bezogen auf 100-m-Auswerteabschnitte.

Neben den mechanisch arbeitenden Messsystemen zur Erfassung der Griffigkeit sind derzeit zudem berührungslose Griffigkeitsmessverfahren in der Erprobung, die die Mega-, Makro- und Mikrotextur erfassen [Steinauer et al. 2012]. Die bisherigen Entwicklungen in der Messtechnik gehen hin zu einer dreidimensionalen Erfassung der Textur einer Fahrbahnoberfläche. Nach Stöckert et al. [2014] ist daher zukünftig eine parameterorientierte Charakterisierung von Straßenoberflächen anzustreben aus der Griffigkeitswerte abgeleitet werden können.

### Teilprojekt 3: Substanzmerkmale (Oberfläche)

Die Erfassung von Substanzmerkmalen der Fahrbahnoberfläche erfolgt mit schnellfahrenden Messsystemen und bildgebenden Verfahren [Stöckert et al. 2014]. Für die Erfassung von Oberflächenschäden werden Systeme für fotografische Film- und Videoaufnahmen verwendet. Hierfür werden senkrecht zur Fahrbahnoberfläche installierte Hochgeschwindigkeitskameras und eine spezielle Beleuchtungsanlage genutzt. Um eine konstante, von den örtlichen Lichtverhältnissen unabhängige Aufzeichnungsqualität zu erhalten, wird der Aufnahmebereich mit Hilfe von Hochleistungsstroboskopen [Socina 2007] oder LED-Leuchten [Stöckert et al. 2014] ausgeleuchtet. Die Videosysteme beinhalten Kameras zur Erfassung von Rissen sowie Kameras, die ein Bild der Straße einschließlich der Randumgebungen aufnehmen und Analysen zu Flickstellen ermöglichen [Straube, Beckedahl 2000]. Über eine Erfassungsbreite von 4,50 m kann mit einer Messgeschwindigkeit von 80 km/h in einem Messpunktabstand von 1 mm der Fahrbahnzustand erfasst werden.

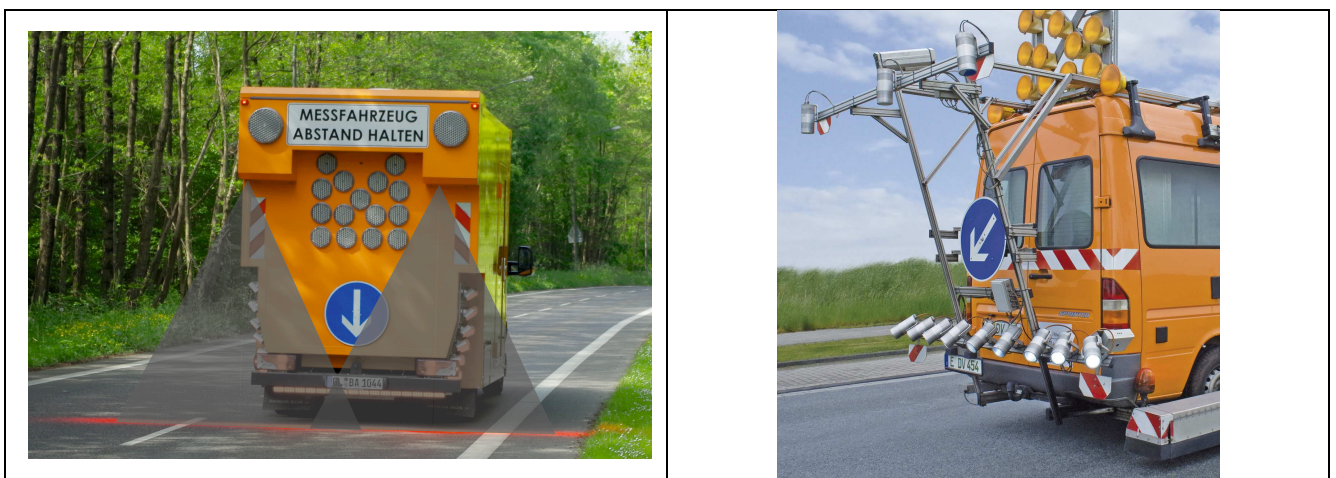


Abbildung 18: Messsystem MEFA [BASt 2018] (links); Messsystem Argus [TÜV Rheinland Schniering 2018]

Aus den während der Fahrt aufgenommenen Film- und Videoaufzeichnungen der Fahrbahnoberfläche werden im Rahmen einer Auswertung mit geschultem Personal gewonnene Längen, Flächenanteile und Anzahl von Oberflächenschäden als Erfassungsgrößen bestimmt [Bühler et al. 2002]. Für die Ermittlung der Zustandsgrößen der Substanzmerkmale (Oberfläche) von Asphaltfahrbahnen wird ein Flächenraster verwendet, welches den Fahrstreifen in Querrichtung in drei Abschnitte gleicher Streifenbreite untergliedert. In Längsrichtung erfolgt die Einteilung in Abschnitte von 1 m Länge. Für einen Auswerteabschnitt mit einer Länge von 100 m entspricht ein Rasterfeld einem Anteil an der Gesamtfläche des Abschnittes von 1/3 % (vgl. Abbildung 19).

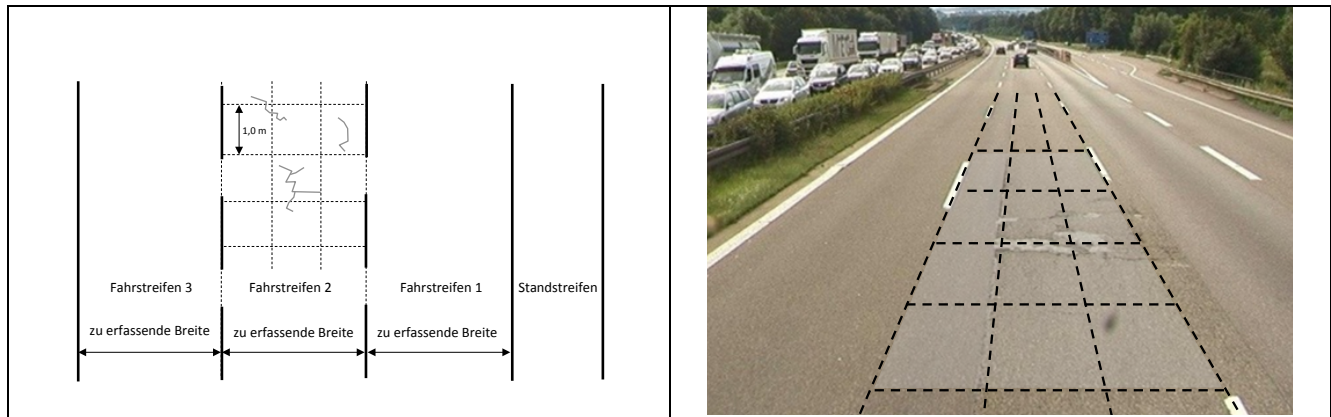


Abbildung 19: Einteilung der Fahrstreifen für die Auswertung von Asphaltbefestigungen (links) [nach ZTV ZEB-StB 2006]; Veranschaulichung der Rasterfelder (rechts)

Die Zustandsgröße **RISS** beschreibt den Anteil der durch Netzzrisse, Risshäufungen und Einzelrisse beschädigten Fläche. Dieser berechnet sich aus dem Anteil aus Schadensfläche dividiert durch die Gesamtfläche des Auswerteabschnitts. Neben dem Rissbild werden die weiteren Oberflächenschäden an Asphaltbefestigungen bei der Bewertung des Oberflächenbildes zu einer **Restschadensfläche (RSFA)** zusammengefasst.

Die Auswertung von Zustandsmerkmalen der Oberflächenschäden erfolgte zu Beginn unter Verwendung von Schätzhilfen, um den Umfang der Ausprägung je Zustandsmerkmal anhand eines visuellen Eindrucks zu beurteilen [Gerlach et al. 1994]. Mittlerweile geschieht dies mit halbautomatischen, digitalen Bildauswertungen [Straube, Beckedahl 2000], bei denen durch eine Bilderkennungssoftware eine Vorauswahl von Abschnitten mit Schäden getroffen wird und anschließend die Schäden auf den ausgewählten Bildern durch das Laborpersonal quantifiziert und dokumentiert werden. Da die bisher nur teilautomatisierte Auswertung eine kostenintensive, manuelle Nachbearbeitung erfordert [Socina 2007; Löcherer 2015], werden seit einigen Jahren Verfahren aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz im Hinblick auf einen automatisierten Auswerteprozess entwickelt und erprobt. Die bisherigen Ergebnisse dieser zumeist auf neuronalen Netzen basierenden Forschungsarbeiten [vgl. Eisenbach et al. 2017] sind vielversprechend.

#### 2.6.2.4 Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Zustandsdaten

Zustandsdaten bilden eine wesentliche Grundlage innerhalb des Prozesskreislaufs des Erhaltungsmanagements. Daher sind im Rahmen der ZEB die folgenden Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Zustandsdaten implementiert [ZTV ZEB-StB 2006]:

- Einzelgeräteprüfung für die zeitbefristete Betriebszulassung (ZbBz)
- Eingangsprüfung der ZEB-Grunddaten
- Überprüfung der Übereinstimmung des Soll-/Ist-Netzes
- Meldung des Erfassungsfortschrittes
- Überprüfung der Erfassungsleistung
- Eigenüberwachung (EÜ)
- Kontrollprüfungen (KP)

Eine messtechnische Zustandserfassung darf nur von Messsystemen durchgeführt werden, die über eine **zeitbefristete Betriebszulassung (ZbBz)** verfügen [ZTV ZEB-StB 2006]. Bei der von der BASt jeweils für ein Jahr vergebenen Betriebszulassung werden das Funktionsprinzip und die Konstruktion des Messsystems sowie zusätzliche technische Einrichtungen, wie z. B. Temperatur- und Abstandsmesseinrichtungen, auf ihre Eignung überprüft.

Ziel der **Eigenüberwachung (EÜ)** ist das Nachweisen der einwandfreien Funktionsweise des Messsystems durch Wiederholungsmessungen bzw. Wiederholungsauswertungen [ZTV ZEB-StB 2006]. Dazu werden auf einem 2 km langen Streckenabschnitt eine Erst- und eine Wiederholungsmessung von dem Auftragnehmer durchgeführt. Anschließend sind die Differenzen der Messergebnisse hinsichtlich Mittelwert und Standardabweichung auf die Einhaltung der vorgegebenen Toleranzen zu prüfen.

In den Teilprojekten 1 bis 3 ist der Auftraggeber dazu verpflichtet, stichprobenhafte Prüfungen durch Kontrollmessungen vorzunehmen, um die Eignung seiner Erfassungs- und Auswertetechnik sowie die fertige Leistung nachzuweisen. Eine **Kontrollprüfung (KP)** ist eine Wiederholungsmessung, bei der geprüft wird, ob die Abweichungen der Differenzen zwischen der Erfassung bzw. Auswertung des Auftragnehmers und den Ergebnissen der Kontrollprüfung im Mittel und in der Standardabweichung innerhalb der festgelegten Toleranzen liegen [ZTV ZEB-StB 2006] (vgl. Anhang A1). Analog zu der Eigenüberwachung sind die Anforderungen an die Differenz der 2-km-Mittelwerte und der Standardabweichung der 100-m-Einzeldifferenzen zu erfüllen.

#### 2.6.2.5 Zustandsbewertung

Im Anschluss an die Zustandserfassung werden innerhalb des Teilprojektes 4 die aufgenommenen Zustandsgrößen in normierte Zustandswerte überführt. Die Zustandsbewertung orientiert sich an den Oberzielen der Straßenerhaltung, welche die *„Erhaltung eines optimalen Straßenzustandes, der dem potentiellen Nutzer einen höchst möglichen Gebrauchswert bei gleichzeitig minimalen gesamtwirtschaftlichen Kosten und höchstmöglicher Umweltverträglichkeit gewährleistet“*, verfolgen [Schmuck 1987b, S. 19]. Die Wirkungen der Ausprägung eines Zustandsmerkmals auf die Erhaltungsziele werden in Abhängigkeit des Anforderungsniveaus abgeschätzt [AP 9/A1]. In der Regel ist die Bewertung von Teilerhaltungszielen, wie z. B. die Verkehrssicherheit, von mehreren Zustandsmerkmalen beeinflusst. Daher werden die Zustandswerte der einzelnen Zustandsmerkmale zu Teil- und Gesamtwerten verknüpft. Eine Bewertung von Wirkungen des Straßenzustandes auf die Umwelt sowie die Abbildung von Nutzerkosten erfolgt derzeit (noch) nicht mit Hilfe von Teilwerten [Weninger-Vycudil et al. 2009]. Dies ist jedoch zukünftig mittels geeigneter Kennzahlen anzustreben [vgl. z. B. Socina, Komma 2015]. Die Zustandsbewertung gliedert sich in drei Teilabschnitte:

1. Normierung der Zustandsgrößen
2. Verknüpfung der Zustandswerte zu Teilwerten
3. Bildung des Gesamtwertes

## 1. Normierung der Zustandsgrößen

Die in den Teilprojekten 1 bis 3 erhobenen und jeweils auf einen 100-m-Abschnitt bezogenen Zustandsgrößen erlauben Aussagen zur quantitativen Schadensausprägung einzelner Zustandsmerkmale [Socina 2007]. Jedoch ist eine eindeutige Aussage hinsichtlich einer Beurteilung des Straßenzustandes damit nicht möglich, da die Wirkungen des Fahrbahnzustandes auf die Erhaltungsziele abhängig von der Funktion des Abschnittes innerhalb des Straßennetzes sind, welche sich anhand der Verbindungsfunktion, der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV), dem Ausbauzustand und der Entwurfsgeschwindigkeit ermitteln lässt [Weninger-Vycudil et al. 2009]. Um merkmalsübergreifende Zustandsanalysen durchführen zu können sowie den Zustand im Hinblick auf die gesetzten Erhaltungsziele zu bewerten, werden die dimensionsbehafteten Zustandsgrößen daher in dimensionslose Zustandswerte transformiert. Dazu werden die in den ZTV ZEB-StB [2018] enthaltenen Normierungsfunktionen je Zustandsmerkmal angewendet:

Formel 1: Allgemeine Normierungsfunktion [ZTV ZEB-StB 2018]

$$ZW = \text{MAX} \left( 1; \text{MIN} \left( 1 + 2,5 \cdot \frac{ZG - ZG_{1,0}}{ZG_{3,5} - ZG_{1,0}}; 3,5 + \frac{ZG - ZG_{3,5}}{ZG_{4,5} - ZG_{3,5}}; 5 \right) \right)$$

Die Bewertungsskala lehnt sich an das Schulnotensystem an und läuft von 1,0 (sehr guter Zustand) bis 5,0 (sehr schlechter Zustand). Als jeweils merkmalsbezogen definierte Kennzahlen mit besonderer Bedeutung werden der Warnwert und der Schwellenwert bezeichnet [AP 9/A1 2001]:

- **Warnwert:** Der Warnwert charakterisiert einen Zustand, dessen Erreichen Anlass zu Analysen der Ursachen für die Zustandsverschlechterung und zu Planung von geeigneten eventuellen Maßnahmen gibt.
- **Schwellenwert:** Als Schwellenwert wird ein Zustandsniveau bezeichnet, bei dem in der Regel Erhaltungsmaßnahmen oder Verkehrsbeschränkungen eingeleitet werden sollen.

In der Abbildung 20 ist der generalisierte Verlauf der Normierungsfunktion mit den beschriebenen Fixpunkten dargestellt.

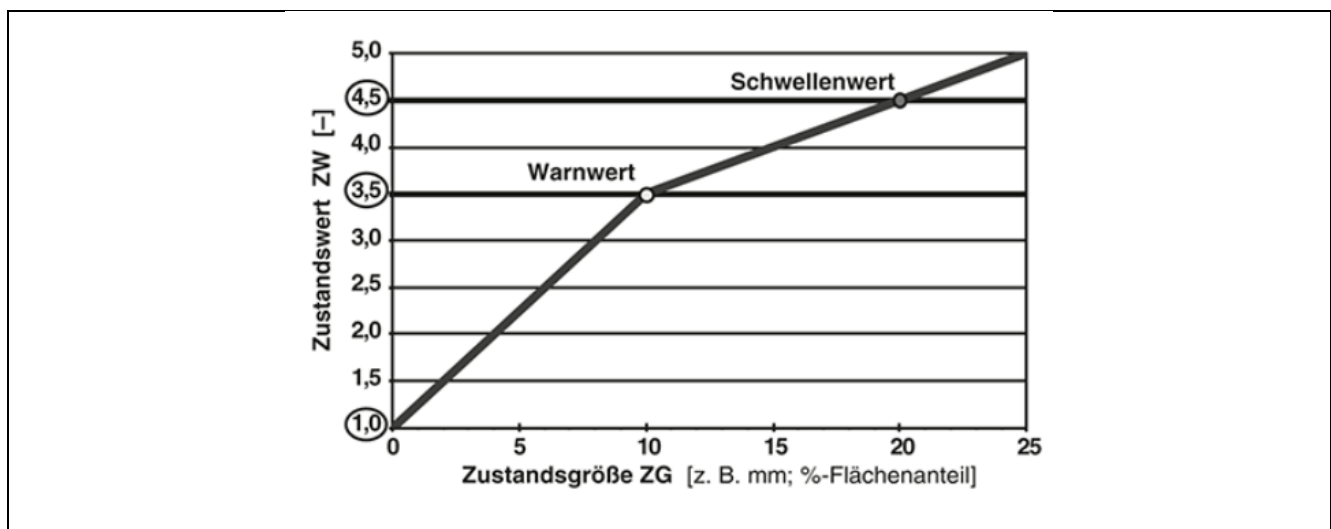


Abbildung 20: Generalisierter Verlauf der Normierungsfunktion mit den beiden Fixpunkten Warn- und Schwellenwert [ZTV ZEB-StB 2018]

## 2. Verknüpfung der Zustandswerte zu Teilwerten

Nach der Normierung der Zustandsgrößen in Zustandswerte werden diese zu Teilwerten zusammengefasst. Die Zustandsmerkmale beschreiben sowohl die an der Oberfläche der Straßenbefestigung erfassbaren Eigenschaften der Fahrbahn als auch deren Wirkungen auf bspw. den Fahrkomfort oder die Verkehrssicherheit. Die Zustandsmerkmale sind daher gleichzeitig für verschiedene Erhaltungsziele mit unterschiedlichen Gewichtungen bedeutsam [AP 9/D 1990]. Die transformierten Zustandswerte je Zustandsmerkmal werden im Hinblick auf eine Bewertung von Teilerhaltungszielen miteinander zu Teilwerten, zum Gebrauchs- und zum Substanzwert (Oberfläche) verknüpft und gewichtet.

Der **Teilwert Nässe (TWN)** ist eine Kennzahl, die aus dem Maximum der beiden Zustandsmerkmale „Fiktive Wassertiefe“ (SPH) und „Griffigkeit“ (GRI) ermittelt wird.

Der **Teilwert Ebenheit (TWE)** ist eine weitere Kennzahl, die sich in Abhängigkeit der Zustandsmerkmale „Allgemeine Unebenheit“ (AUN) und „Spurrinnentiefe“ (SPT), nach folgender Formel berechnen lässt:

Formel 2: Berechnungsformel für den Teilwert Ebenheit

$$TWE = MIN(5; MAX(ZWAUN; ZWSPT) + 0,2 \cdot MIN(ZWAUN; ZWSPT) - 0,2)$$

Der **Teilwert Ebenheit im Längs- und Querprofil (TWELQ)** ist ein Zustandsindikator, der sich aus dem Maximum der Zustandsmerkmale „Allgemeine Unebenheit“ (AUN) und „Spurrinnentiefe“ (SPT) ermitteln lässt.

Der **Gebrauchswert (GEB)** ist ein Teilwert für das Erhaltungsziel Gebrauch (Sicherheit und Befahrbarkeit), der durch Verknüpfung der Zustandsmerkmale „Allgemeine Unebenheit“ (AUN), „Spurrinnentiefe“ (SPT), „fiktive Wassertiefe“ (SPH) und „Griffigkeit“ (GRI) gebildet wird.

Ein weiterer Indikator ist der **Teilwert Risse und andere Oberflächenschäden Asphalt (TWRIO)**, der sich wie folgt berechnen lässt:

Formel 3: Berechnungsformel für den Teilwert Risse und andere Oberflächenschäden für Asphaltbefestigungen

$$TWRIO = MIN(5; ZWRISS + 0,5 \cdot ZWRSFA - 0,5)$$

Analog zu dem substanzbezogenen Teilwert für Asphaltbefestigungen gibt es den **Teilwert Risse und andere Oberflächenschäden Beton (TWRIO)**, der sich nach folgender Formel berechnen lässt:

Formel 4: Berechnungsformel für den Teilwert Risse und andere Oberflächenschäden für Betonbefestigungen

$$TWRIO = MIN(5; ZWLQR + 0,5 \cdot ZWRSFB - 0,5)$$

Der **Substanzwert (Oberfläche) (SUB)** ist ein Teilwert für das Erhaltungsziel Substanzerhalt, der durch Verknüpfung der Zustandsmerkmale Netzzrisse und Flickstellen sowie den Indikatoren der Ebenheit gebildet wird. Dieser berechnet sich wie folgt:



$$SUB = MIN(5; MAX(TWELQ; TWRIO) + 0,2 \cdot MIN(TWELQ; TWRIO) - 0,2)$$

### 3. Bildung des Gesamtwertes

Nachdem die Teil-, Gebrauchs- und Substanzwerte gebildet wurden, kann ein Gesamtwert ermittelt werden. Der **Gesamtwert (GW)** ist das Maximum aus dem Gebrauchswert und dem Substanzwert (Oberfläche). Durch die Verwendung des maximalen Wertes dieser beiden Teilwerte wird ein Straßenabschnitt als schlecht bewertet, auch wenn nur eines der beiden Erhaltungsziele (Gebrauch und Substanz) nicht erreicht wird [Socina 2007]. Der Ablauf der Zustandsbewertung ist in der Abbildung 21 schematisch dargestellt.

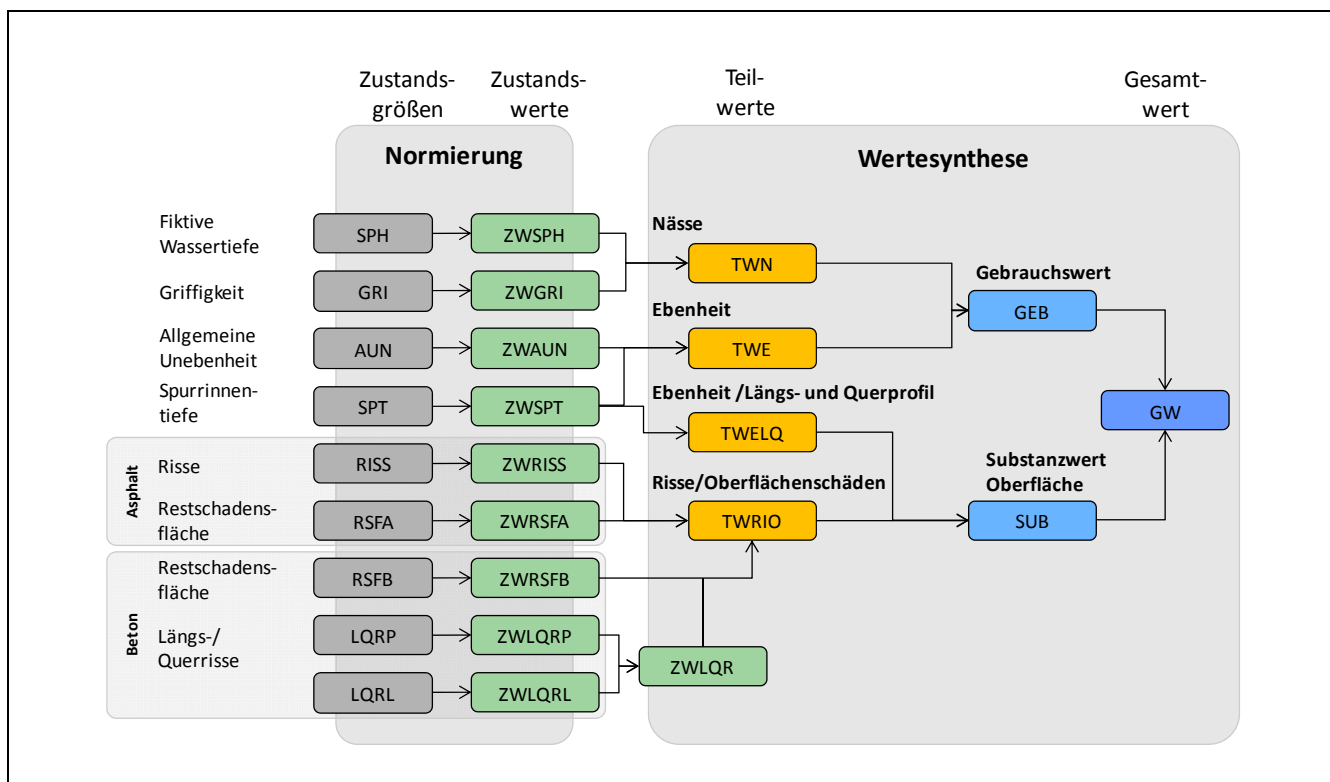


Abbildung 21: Verknüpfung von Zustandswerten zu Teil- und Gesamtwert für Straßenbefestigungen [BASt 2018]

Die netzweite Bewertung des aktuellen Straßenzustandes dient als Grundlage für die darauffolgenden Kernprozesse. Die Kernprozesse Prognose der Zustandsentwicklung, Erhaltungsstrategie und Erhaltungsprogramm werden aufgrund des großen Datenumfanges in der Regel mit Hilfe eines rechnergestützten Pavement Management Systems durchgeführt. Der grundsätzliche Aufbau dieses Systems sowie dessen Einordnung in den Prozesskreislauf werden im nachfolgenden Kapitel 2.6.3 erläutert.

### 2.6.3 Pavement Management System (PMS)

Als Pavement Management System (PMS) wird ein rechnergestützter Verfahrensablauf bezeichnet, um den zukünftigen Erhaltungsbedarf eines Straßennetzes unter definierten Randbedingungen mit einem wirtschaftlich optimalen Einsatz von Ressourcen abzuschätzen. Mit Hilfe des PMS können einerseits Finanzszenarios evaluiert werden, bei denen der Netzzustand in Abhängigkeit des eingesetzten Budgets analysiert wird. Andererseits lassen sich Qualitätsszenarios gegenüberstellen, die zum Erreichen von definierten Qualitätsniveaus des Netzes innerhalb eines Analysezeitraums die hierfür notwendigen Finanzmittel abschätzen [Maerschalk, Socina 2008]. Die Grundstruktur des PMS-Moduls gliedert sich in acht Module (vgl. Abbildung 22) und wurde seit dessen Erstanwendung nur geringfügig geändert [Krause, Maerschalk 2010]. Die wesentlichen Informationen zum Modellaufbau und der benötigten Datengrundlage sind in den Arbeitspapieren zur Systematik der Straßenerhaltung (Reihe R) [AP 9/R1; AP 9/R2] dokumentiert.

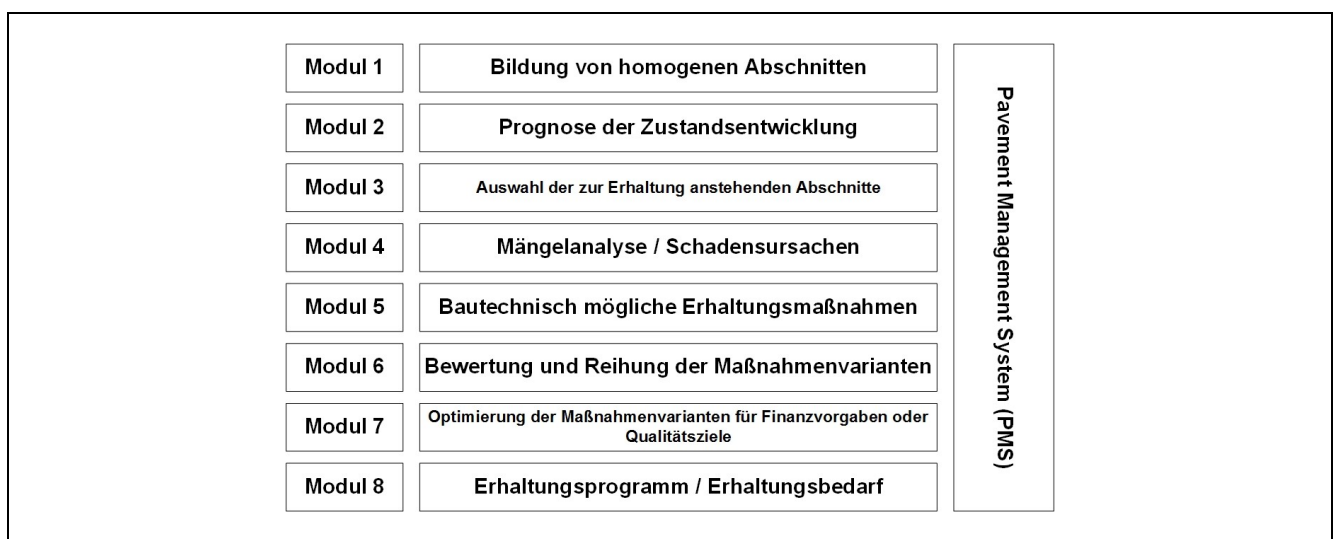


Abbildung 22: Prozessschritte innerhalb der rechnergestützten Erhaltungsplanung (PMS) [Maerschalk, Krause 2010]

In Bezug auf die zuvor vorgestellte Zustandsbewertung (vgl. Kapitel 2.6.2.5) erfolgt die Bildung von Teil- und Gesamtwerten im Rahmen von PMS-Rechenläufen derzeit nach einer alternativen Verknüpfungsformel. Während sich die in den ZTV ZEB-StB [2018] enthaltenen Verknüpfungsvorschriften auf die Oberflächeneigenschaften beschränken, findet innerhalb des PMS zusätzlich die strukturelle Substanz bei der Bewertung der Fahrbahnbefestigung Berücksichtigung [Hess et al. 2018]. Die damit verbundenen Grundlagen sind dem Arbeitspapier AP 9/S zu entnehmen.

Nachdem für jeden Auswerteabschnitt die Zustandswerte gebildet wurden, werden im Rahmen der Datenaufbereitung zunächst **homogene Abschnitte** mit einer Mindestlänge von 500 m gebildet, um realistische Maßnahmenvorschläge für erhaltungsbedürftige Streckenabschnitte zu erhalten [Stöckert, Schmerbeck, Lau 2019]. Dazu werden die aus der messtechnischen Zustandserfassung vorliegenden Auswerteabschnitte zu homogenen Abschnitten anhand von Kriterien, wie z. B. Zustandswerte, vergleichbarer Deckenaufbau und Verkehrsbelastung zu längeren Bereichen aggregiert [Maerschalk 2001; Maerschalk et al. 2020]. Der hierbei derzeit angewendete Algorithmus (HARC- bzw. BIRC-Verfahren) ist in Rübensam und Schulze [1996] dokumentiert. Diese Datenaufbereitung erfolgt innerhalb von **Modul 1** des PMS.



## 2.6.4 Prognose der Zustandsentwicklung

Innerhalb des **Moduls 2** erfolgt die **Zustandsprognose** auf Basis der in Modul 1 gebildeten homogenen Abschnitte. Dieses Modul stellt, neben der innerhalb der ZEB erfolgten Dokumentation und Analyse des derzeitigen Zustandes eines Straßennetzes, eine wesentliche Komponente im Rahmen eines PMS dar. Die Prognose der Zustandsentwicklung bildet die Grundlage, um den zukünftigen Erhaltungsbedarf abzuschätzen, da anhand von merkmalspezifischen Verhaltensfunktionen sowohl der Schadensverlauf vor als auch nach der Durchführung einer Erhaltungsmaßnahme modelliert wird [Maerschalk et al. 2020]. Je nach Art der Maßnahme, sind ein maßnahmenpezifischer Rücksetzwert und eine aktualisierte Verhaltenskurve für jeden homogenen Abschnitt anzusetzen (vgl. Abbildung 23).

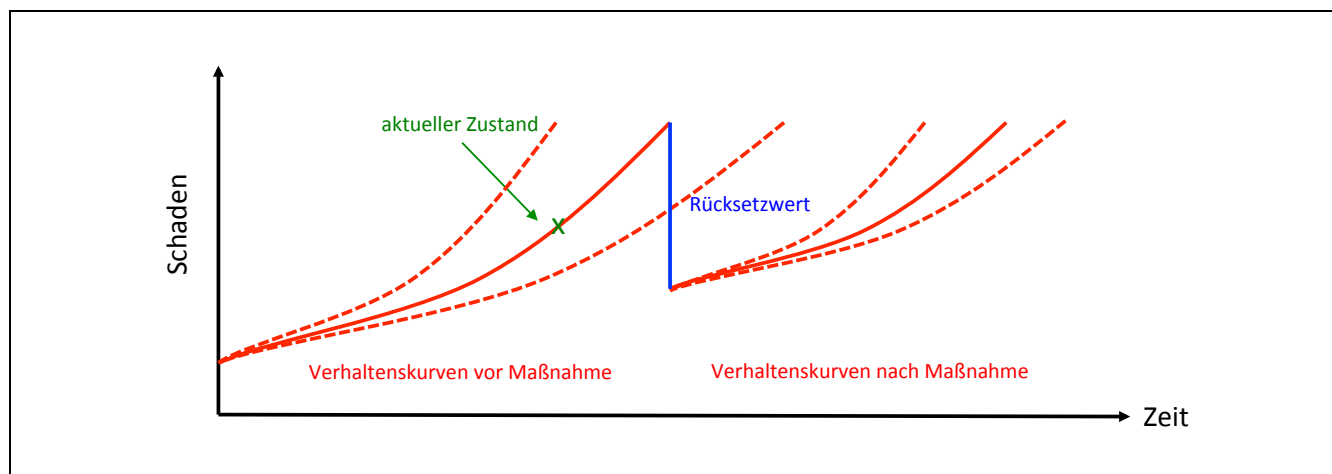


Abbildung 23: Zweimalige Anwendung von Verhaltensfunktionen zur Zustandsprognose innerhalb des PMS

Die im PMS für die abschnittsbezogene Zustandsprognose hinterlegten Verhaltenskurven wurden im Laufe der Zeit im Rahmen von Forschungsprojekten [z. B. Maerschalk, Krause 2004; Oertelt 2007] mehrfach überprüft und aktualisiert. Die Zustandsprognose erfolgt bisher mit Hilfe von deterministischen Verhaltensfunktionen auf Basis von Zustandswerten [Krause, Maerschalk 2010]. Dies stellt eine historisch entstandene Zwischenlösung dar, die damals aufgrund von beschränkten Rechenkapazitäten eingeführt wurde. Die Problematik der auf Zustandswerten basierenden Prognose ist seit Längerem in den Fachkreisen bekannt [Stöckert et al. 2019]. Untersuchungen zur Zustandsentwicklung anhand von Zustandsgrößen wurden im Rahmen von mehreren Forschungsvorhaben erarbeitet (vgl. Hinsch et al. 2005; Oertelt 2007) und werden derzeit in die Verfahren des PMS implementiert [Maerschalk et al. 2020].

Als Voraussetzung für die Anwendung des deterministischen Ansatzes wird nach Maerschalk [2001] angenommen, dass sich in den aktuell gemessenen Zustandsdaten sämtliche Einflüsse aus Baustoffeigenschaften, Einbaubedingungen, Verkehrsbelastung, klimatischen Bedingungen, Maßnahmen der baulichen Unterhaltung etc. widerspiegeln. Zudem muss die Liegezeit des betrachteten homogenen Abschnittes bekannt sein. Weiterhin wird die Annahme getroffen, dass zum Zeitpunkt des Neubaus der Zustand der Straßenoberfläche optimal ( $ZW = 1,0$ ) war. Zuletzt muss der Typ der merkmalspezifischen Verhaltensfunktion bekannt sein [Oertelt 2007]. Die Standardverhaltensfunktionen werden mit der folgenden mathematischen Potenzfunktion beschrieben:

$$ZW_i(t) = 1 + a \cdot t^b$$

mit:  $ZW_i(t)$  merkmalspezifischer Zustandswert zum Zeitpunkt  $t$   
 $a, b$  spezifische Verlaufskoeffizienten  
 $t$  Alter der Deckschicht in Jahren

Als Ausgangslage wird zunächst anhand des aktuell gemessenen und anschließend transformierten Zustandswertes (vgl. Kapitel 2.6.2.5) und der Liegezeit des homogenen Abschnittes eine Verhaltensklasse bestimmt (vgl. Abbildung 24).

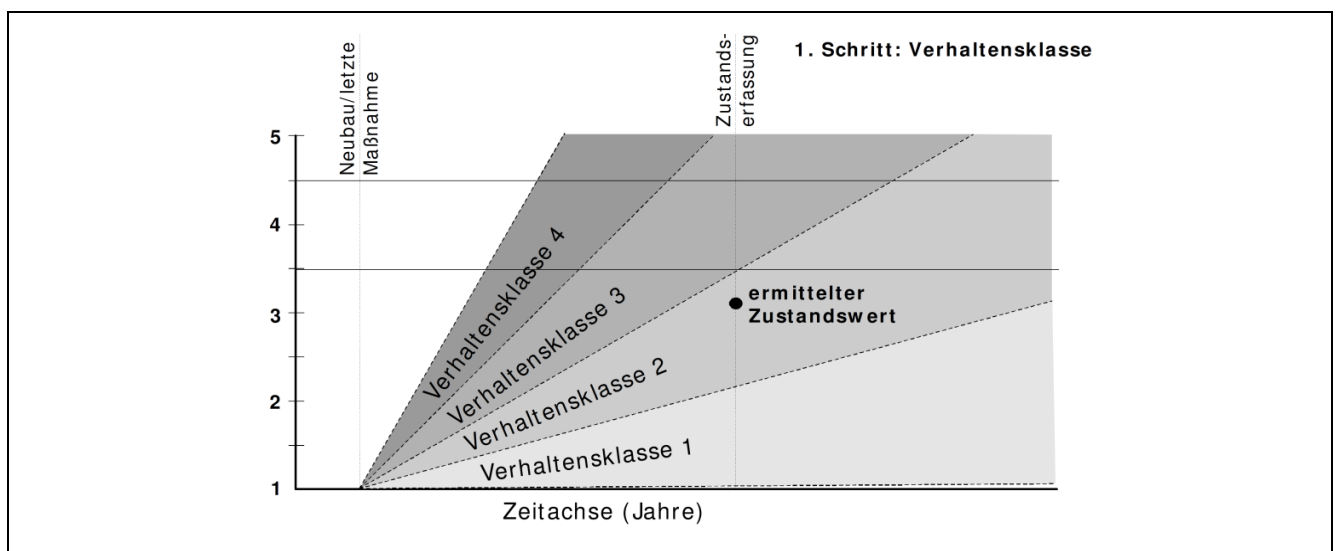


Abbildung 24: Ermittlung der Verhaltensklasse [RPE-Stra 01]

Je nach Verhaltensklasse können unterschiedlich starke Schadenszunahmen mit merkmalspezifischen Verhaltensfunktionen modelliert werden. Für Rechenläufe innerhalb des PMS werden derzeit die von Maerschalk und Socina [2008] ermittelten Verhaltensfunktionen verwendet.

In einem zweiten Schritt wird die Verhaltensfunktion für jedes Zustandsmerkmal separat angepasst, sodass der aktuelle Zustandswert auf der entsprechenden Verhaltenskurve liegt (vgl. Abbildung 25).

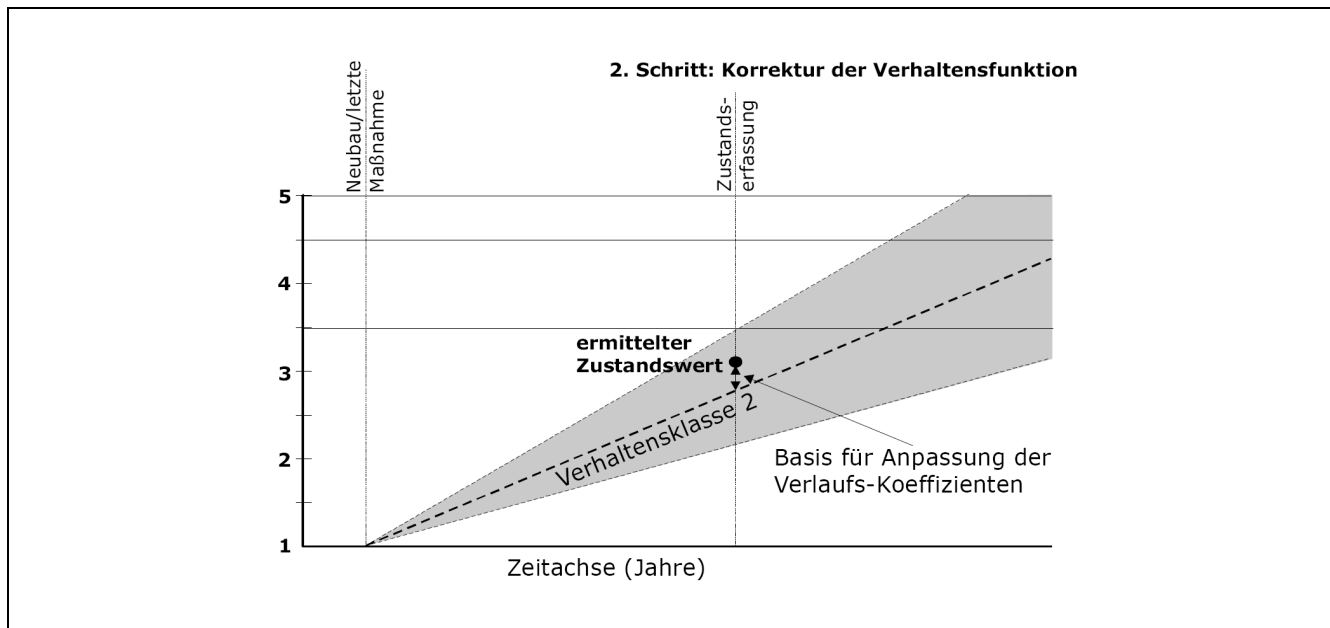


Abbildung 25: Korrektur der Verhaltensfunktion [RPE-Stra 01]

Die Anpassung der Verhaltensfunktion kann entweder anhand einer Modifizierung der Koeffizienten [RPE-Stra 01; Hinsch et al. 2005; Oertelt 2007] oder durch ein Curve-Shifting-Verfahren mit dem von Maerschalk und Socina [2008] vorgestellten Verfahren erfolgen, wie es derzeit auch innerhalb des PMS Anwendung findet. Bei dem Verfahren der Koeffizientenanpassung wird der Koeffizient  $b$  beibehalten und der Koeffizient  $a$  berechnet nach:

Formel 7: Anpassung des Verlaufskoeffizienten  $a$

$$a = \frac{(ZW_i - 1)}{t_i^b}$$

mit:  $ZW_i$  Zustandswert aus der aktuellen ZEB  
 $t_i$  Zeit von Neubau/Erhaltung bis zur aktuellen ZEB in Jahren  
 $a, b$  spezifische Verlaufskoeffizienten

Die Koeffizientenanpassung ermöglicht sowohl eine Variation der Geschwindigkeit der Zustandsverschlechterung als auch eine Variation der Form des Funktionsverlaufs [Hess et al. 2018].

Bei der Anwendung des Curve-Shifting-Verfahrens wird anhand des Deckschichtalters und der theoretischen Verhaltensfunktion der *SOLL*-Wert für den Zustandswert im aktuellen und vorherigen Jahr bestimmt. Die Differenz dieser beiden Werte, d. h. die theoretische Verschlechterung des Zustandswertes, wird anschließend zu dem tatsächlichen *IST*-Wert des Vorjahres addiert:

Formel 8: Anpassung des Funktionsverlaufs anhand des Curve-Shifting-Verfahrens

$$ZW_{(t)} = ZW_{(t-1)} + (ZW_{SOLL(t)} - ZW_{SOLL(t-1)})$$

---

mit:	$ZW_{(t)}$	<i>IST</i> -Zustand im aktuellen Jahr
	$ZW_{(t-1)}$	tatsächlicher <i>IST</i> -Zustand im vorherigen Jahr
	$ZW_{SOLL(t)}$	<i>SOLL</i> -Wert für den Zustand im aktuellen Jahr
	$ZW_{SOLL(t-1)}$	<i>SOLL</i> -Wert für den Zustand im vorherigen Jahr

Als Vorjahreswert kann sowohl der gemessene Zustandswert aus der ZEB als auch ein prognostizierter Zustandswert verwendet werden [Maerschalk, Socina 2008]. Im Ergebnis erfolgt eine Verschiebung der Verhaltensfunktion durch den Ausgangswert mit einem Zusatzterm.

Die in Modul 2 enthaltenen abschnitts- und merkmalspezifischen Verhaltensfunktionen werden anschließend innerhalb des **Moduls 3** dazu verwendet, für einen zuvor zu definierenden Eingreifbereich innerhalb eines Prognosezeitraums die **Anzahl an zu erhaltenden homogenen Abschnitten** zu bestimmen [Maerschalk 2001].

### 2.6.5 Erhaltungsstrategie

Die Erhaltungsstrategie ist das Gesamtkonzept der Straßenerhaltung zum Erreichen der definierten Erhaltungsziele unter Beachtung der vorhandenen Ressourcen [RPE-Stra in Vorbereitung]. Sie beinhaltet die Festlegung einer Abfolge mehrerer Erhaltungsmaßnahmen innerhalb einer Analyseperiode [Weninger-Vycudil et al. 2016]. Auf Basis einer Analyse und Bewertung der bisherigen Tätigkeiten sowie den vorgegebenen Erhaltungszielen wird eine Erhaltungsstrategie entwickelt bzw. in jedem neuen Prozesszyklus überprüft. Gegebenenfalls kann es notwendig sein, die Strategie bzw. die Ziele anzupassen [RPE-Stra in Vorbereitung].

Zu den wichtigsten Erhaltungszielen zählen die Optimierung der Verkehrssicherheit und des Fahrkomforts, der langfristige Erhalt der Fahrbahnsubstanz und die Nachhaltigkeit im Hinblick auf Umwelt- und Klimaschutz [Heller 2012] (vgl. auch Kapitel 2.5). Auf strategischer Ebene können diese Ziele je nach Betrachtungsstandpunkt aus u. a. technischer, funktionaler, finanzieller oder baubetrieblicher Sicht gesetzt werden [Degelmann 2011]. Ein typisches Qualitätsszenario ist bspw. die Frage nach dem langfristig erforderlichen Investitionsbedarf, um ein definiertes Zustandsniveau oder eine definierte Verteilung der Altersstruktur eines Straßennetzes zu erreichen oder zu halten [Heller 2012]. Innerhalb von PMS-Rechenläufen kommen nach Maerschalk [2013] meist Hybridszenarien aus einem Qualitäts- und Budgetszenario zum Einsatz.

### 2.6.6 Erhaltungsprogramm

Die Aufstellung eines Erhaltungsprogramms orientiert sich an der zuvor definierten Erhaltungsstrategie und unterteilt sich in die Maßnahmenplanung und -optimierung [Degelmann 2011]. Im Rahmen des Erhaltungsprogramms wird die Frage nach konkreten Erhaltungsmaßnahmen auf einen kurz- und mittelfristigen Planungshorizont unter Beachtung von einzuhaltenden Budgetvorgaben gestellt (Budgetszenario) [Heller 2012].

Für eine sachgerechte Maßnahmenauswahl werden innerhalb des **Moduls 4** die ermittelten homogenen Abschnitte auf Ursachen für das jeweils vorliegende Schadensbild analysiert. Dazu wird eine **Mängelanalyse** durchgeführt.

Im Rahmen von **Modul 5** werden für jedes abschnittsspezifische Schadensbild im Anschluss **bautechnisch mögliche Maßnahmenvarianten** identifiziert. Hierbei stehen in der Regel mehrere, sowohl

technisch als auch zeitlich differierende Handlungsalternativen je Abschnitt zur Auswahl. Dieser Planungsschritt ist von einer engen Abstimmung zwischen der strategischen und der operativen Ebene gekennzeichnet.

Eine **Bewertung und Reihung der ermittelten Maßnahmenvarianten** erfolgt in **Modul 6**. Bei der Maßnahmenreihung wird für jeden Straßenabschnitt eine Erhaltungsstrategie ermittelt, die sich auf Basis einer Nutzen-Kosten-Analyse und eventuellen Randbedingungen, wie z. B. Budgetvorgaben als „optimal“ erweist [Krause 2001]. Für die Beurteilung des Nutzens, der sich bei der Straßenerhaltung einstellt, wird die Substanz- bzw. die Zustandsverbesserung des betrachteten Straßenabschnittes nach der Durchführung einer Maßnahme im Vergleich zu dem vorherigen Zustand analysiert [Stütze 2004]. Der Nutzen einer Maßnahme lässt sich grafisch als „Fläche unter der Kurve“ darstellen [Maerschalk 2001] (vgl. Abbildung 26).

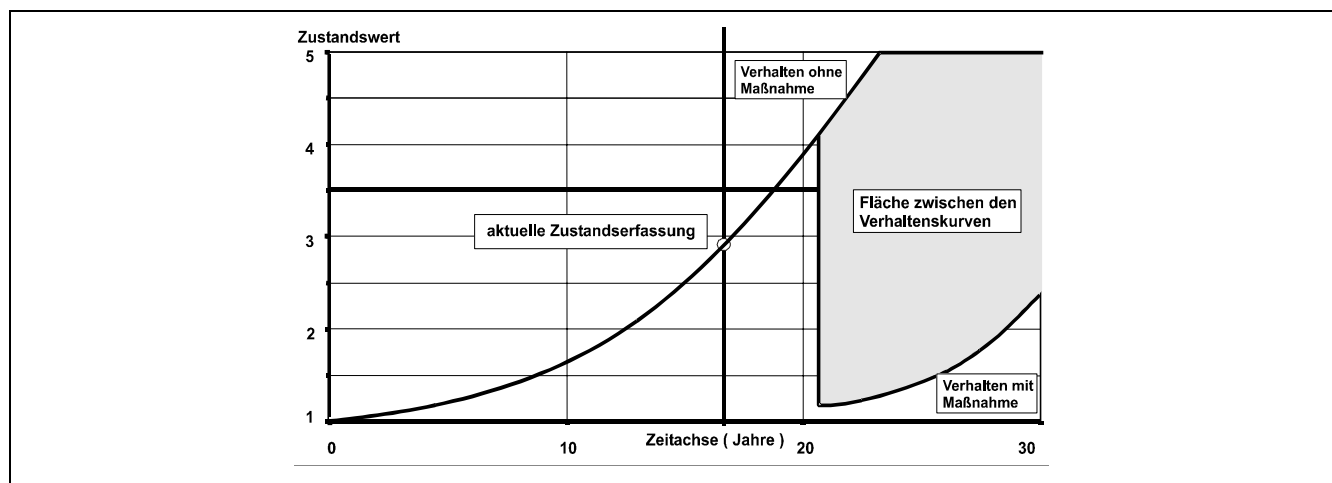


Abbildung 26: Grafische Darstellung des Nutzens einer Maßnahme [Maerschalk 2001]

Die ermittelte Fläche zwischen den beiden Kurvenverläufen wird mit der Abschnittslänge und der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) gewichtet und führt bei langen und verkehrsreichen Abschnitten oder bei Fahrbahnquerschnitten mit mehreren Fahrstreifen zu einem entsprechend größeren Nutzen [Krause 2001]. Für die Nutzenermittlung wird derzeit die Veränderung des Gesamtwertes herangezogen. Diese Beurteilung stellt ein nicht monetäres Verfahren dar, da die Qualitätssteigerung lediglich auf Basis der Zustandsänderung der Fahrbahnoberfläche abgeleitet wird [Stütze 2004; Maerschalk, Socina 2008]. Für die Auswahl geeigneter Erhaltungsmaßnahmen werden die Erhaltungsabschnitte nach ihrem Nutzen-Kosten-Verhältnis aufsteigend für die diskontierten Einheitskosten je Maßnahme gereiht [Maerschalk 2001].

Das **Modul 7** beinhaltet die netzweite **Optimierung** der Maßnahmenauswahl auf strategischer Ebene. Unter Vorgabe einer Zielfunktion, wie z. B. dem maximalen Nutzenzuwachs bei ansteigenden Kosten, sowie weiterer finanzieller oder personeller Randbedingungen erfolgt eine Optimierung aller für die einzelnen Abschnitte ermittelten Maßnahmenalternativen auf Basis eines heuristischen Verfahrens [Maerschalk 2001]. Die sogenannte „konvex Einhüllende“ wird aus den effektivsten Maßnahmen gebildet und zeigt die Lage auf der sich das (betriebswirtschaftliche) Optimum aus Nutzen und Kosten befindet (vgl. Abbildung 27) [Stütze 2004].

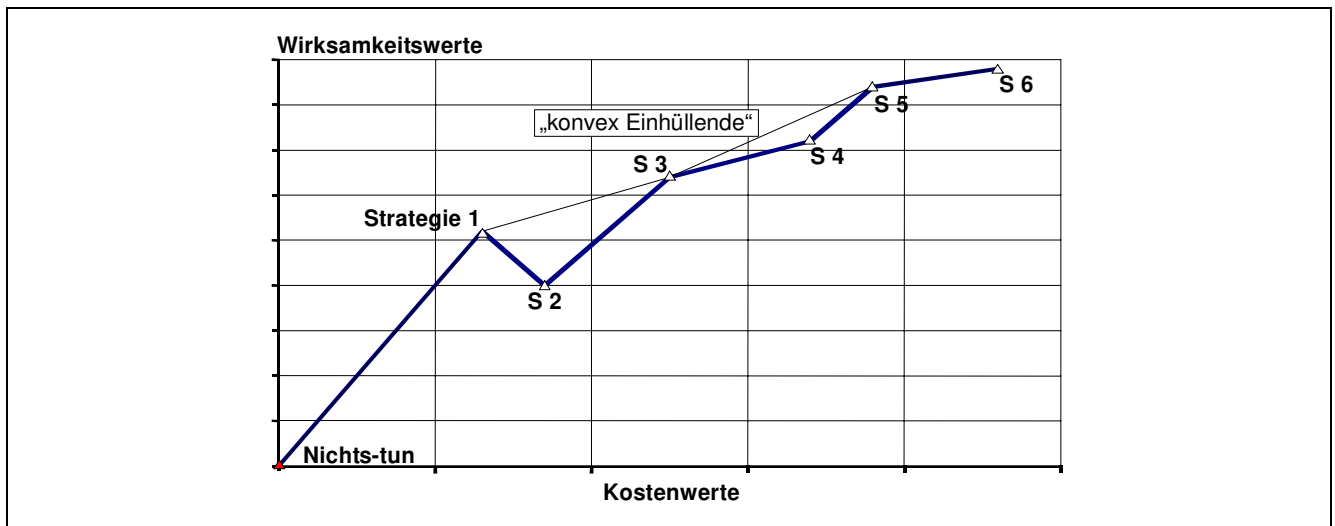


Abbildung 27: „Konvex Einhüllende“ aus gewichteter Maßnahmenreihung [Maerschalk 1997]

In Abhängigkeit der zuvor gesetzten Qualitäts- und Budgetszenarien erfolgt schließlich die Auswahl der „optimalen“ Maßnahmenvariante und die **Abschätzung des Erhaltungsbedarfs** in **Modul 8**. Basierend auf der Analyse des aktuellen und zukünftigen Zustandes wird ein Verteilungsschlüssel für die Bestandserhaltung des Straßennetzes erstellt. Dieser mit Hilfe des PMS ermittelte „optimale“ Lösungsvorschlag für die Maßnahmenvarianten bedarf in der Regel einer ingenieurtechnischen Nachbearbeitung, um ein auf der operativen Ebene umsetzbares Bauprogramm zu erstellen [Hess et al. 2018].

### 2.6.7 Bauprogramm

Das Bauprogramm beinhaltet die Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen auf der operativen Ebene für einen kurz- bis mittelfristigen Planungshorizont zwischen einem bis fünf Jahren, die auf Basis der innerhalb des PMS vorgeschlagenen, vergleichsweise allgemein formulierten Maßnahmen zeitlich und örtlich konkretisiert werden. Die Maßnahmenauswahl auf der operativen Ebene steht somit in enger Verbindung zu den Festlegungen der Erhaltungsstrategie und des Erhaltungsprogramms. Das Ziel der Bauprogramme ist es, die verfügbaren finanziellen Mittel auf der Grundlage von objektiven Bewertungskriterien bedarfsorientiert einzelnen Bauämtern bzw. Strecken zuzuordnen [Degelmann 2011].

Für diese Entscheidungsprozesse werden Daten in erhöhter Qualität und Auflösung, wie z. B. Streckenbilder, Daten zum Straßeninventar etc. benötigt, um lokale Randbedingungen mitzuberücksichtigen [Heller 2012]. Als Auswahlkriterien für Arten von Erhaltungsmaßnahmen können nach Krause [2001] z. B. die Art der letzten Erhaltungsmaßnahme, der theoretisch erforderliche Hocheinbau laut Bewertung der Substanz nach dem Dickenäquivalenzprinzip oder die freie Höhe aus dem vorhandenen Lichtraumprofil herangezogen werden. Auf der operativen Ebene ist die Tendenz zu erkennen, dass Auswertungen nach pragmatischen, transparenten und überschaubaren Bewertungskriterien erfolgen [Heller 2011].

### 2.6.8 Bauabwicklung

Die Bauabwicklung beinhaltet die konkrete bauliche Umsetzung der zuvor im Bauprogramm festgelegten Erhaltungsmaßnahmen. Darin enthalten sind die bautechnische und -betriebliche Planung der Maßnahmen, die Ausschreibung und Vergabe der Bauleistungen sowie Bauleitung und -überwachung durch den Bauherrn. Die in den vergangenen Jahren zunehmende Anzahl an Baumaßnahmen erfor-

---

dert eine intelligente Planung und Vorbereitung solcher Maßnahmen, um das Ausmaß der Beeinträchtigungen des Verkehrsablaufs so gering wie möglich zu halten. Die Verfügbarkeit des Straßennetzes ist mittlerweile eine bedeutende Kenngröße, sodass die netzweite Koordinierung von Baumaßnahmen zukünftig eine bedeutende Rolle spielen wird [Maerschalk et al. 2020].

### **2.6.9 Controlling und Datenaktualisierung**

Das Controlling und die Datenaktualisierung stellen den letzten Arbeitsschritt innerhalb des Prozesskreislafes des Erhaltungsmanagements dar. Im Rahmen des Controllings wird geprüft, ob die gesetzten strategischen Ziele erreicht wurden [Degelmann 2011]. Die Überprüfung der Zielerreichung basiert dabei nicht auf Einzelbetrachtungen auf der Projektebene, sondern auf einer übergeordneten Beurteilung der durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen. Der Trend geht derzeit hin zu einer anlagenübergreifenden Bewertung der durchgeführten Maßnahmen und deren Nutzen [Hellmann, Rübensam 2008; Maerschalk, Socina 2008]. Als Bewertungskriterien werden zukünftig neben dem Zustand des Straßennetzes weitere nutzerorientierte sowie umweltbezogene Kennzahlen herangezogen, die die Wirkungen von Erhaltungsmaßnahmen möglichst aus Sicht aller Akteure quantifizieren können. Diese Indikatoren müssen u. a. spezifisch, messbar, erreichbar, relevant und nicht manipulierbar sein, damit diese als objektive Bewertungskriterien zur Erfolgskontrolle verwendet werden können.

Die erzielten Ergebnisse müssen systematisch und präzise dokumentiert sowie stets aktualisiert werden, da sie als Grundlage für die darauffolgenden Analyse-, Bewertungs- und Prognoseverfahren dienen. Nur mit einer aktuellen und qualitativ abgesicherten Datenbasis können für den nächsten Planungskreislauf belastbare Analysen durchgeführt werden. Auswertungen von nicht aktualisierten Daten führen zu verzerrten Ergebnissen und damit letztlich zu suboptimalen Entscheidungen hinsichtlich durchzuführender Erhaltungsmaßnahmen. Die Datenaktualisierung erfordert einen definierten Prozess, für dessen Umsetzung sowohl personelle als auch finanzielle Ressourcen bereitgestellt werden müssen.

## **2.7 Kapitelzusammenfassung**

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen des systematischen Erhaltungsmanagements von Straßen in Deutschland dargestellt. Zunächst wurden die relevanten Akteure innerhalb der Straßenerhaltung benannt und deren Anforderungen und Erwartungen erläutert. Aus diesen Anforderungen lassen sich für die Straßenerhaltung relevante Ziele ableiten. Für die systematische Koordination von Prozessen zur bestmöglichen Zielerreichung wurde bereits gegen Ende der 1980er Jahre ein Managementsystem eingeführt, welches auf dem klassischen Konzept eines Qualitätsmanagements basiert. Ein wesentliches Element dieses Prozesskreislafes ist die ZEB.

Im Rahmen der ZEB wird der Oberflächenzustand einer Straße mit Hilfe von Zustandsmerkmalen bzw. -größen quantitativ beschrieben und in dimensionslose Zustandswerte überführt. Die ZEB stellt ein wichtiges Werkzeug des Erhaltungsmanagements dar, da sie die relevanten Informationen zum aktuellen (Oberflächen-)Zustand des Straßennetzes umfasst und als Eingangsgröße für die darauf aufbauenden Entscheidungsprozesse dient.

Neben dem aktuellen Zustand bildet das Wissen über den zukünftigen Zustand eines Straßennetzes die Grundlage für die Entwicklung einer Erhaltungsstrategie. Diese beinhaltet das Gesamtkonzept der Straßenerhaltung zum Erreichen der definierten Erhaltungsziele unter Beachtung der vorhandenen Ressourcen. Für eine prognostizierende Erhaltungsplanung ist die präzise Abschätzung der Zustands-

---

entwicklung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten von besonderer Relevanz. Die Zustandsentwicklung ist jedoch durch eine Vielzahl von Einflussgrößen bzw. Ursachen geprägt, sodass die Nutzungsdauer von Straßen in der Regel stark streut. Für eine Modellierung dieses Schädigungsprozesses kommen im deutschen PMS derzeit deterministische Modelle zur Anwendung, die jedoch nur begrenzt eine Abbildung der vorhandenen Streuungen ermöglichen. Probabilistische Modellierungstechniken erlauben hingegen die Möglichkeit, eine Quantifizierung von Risiken vorzunehmen. Trotz dieses bedeutenden Vorteils beschränkt sich deren Anwendung auf Straßenzustandsdaten jedoch bisher auf eine geringe Anzahl an Anwendungsfällen. Einen tiefergehenden Einblick zu probabilistischen Analyse- und Prognosemethoden erfolgt im anschließenden Kapitel 3.



---

## 3 Probabilistische Analyse- und Prognosemethoden

---

### 3.1 Allgemeines

Im vorherigen Kapitel wurde aufgezeigt, dass die Zustandsprognose ein wesentlicher Baustein innerhalb des Erhaltungsmanagements ist. Die bisher eingesetzten deterministischen Prognoseverfahren erlauben nur sehr begrenzt eine Abbildung von Unsicherheiten. Da jedoch die Zustandsentwicklung von Fahrbahnbefestigungen durch eine Vielzahl an Einflussfaktoren bestimmt wird, die jeweils erhebliche Streuungen aufweisen, liegt es nahe, das Zustandsverhalten von Straßen mit probabilistischen Verfahren zu beschreiben.

In diesem Kapitel wird daher zunächst die Relevanz probabilistischer Analyse- und Prognosemethoden erläutert und deren Vorteile im Vergleich zu den deterministischen Methoden dargestellt. Anhand eines systematischen Vergleichs und den Erfahrungen aus bisherigen Anwendungen in verschiedenen Fachdisziplinen werden die Variationen probabilistischer Methoden gegenübergestellt. Hierbei werden die Vor- und Nachteile der Methoden im Hinblick auf eine Anwendung auf Straßenzustandsdaten sowie deren Weiterentwicklungspotentiale diskutiert.

Das Kapitel schließt mit einer Darstellung der Grundlagen zur Strukturgleichungsmodellierung, die im weiteren Verlauf der Arbeit (vgl. Kapitel 6) als Analyse- und Prognosemethode Anwendung findet.

### 3.2 Einführung

Die vorausschauende Abschätzung der Zustandsentwicklung von Straßen ist bis heute nicht zufriedenstellend gelöst. Obgleich jede Prognose stets mit Unsicherheiten behaftet ist, trifft dies nach Ressel, Tejkl und Klöpfer [2013] bei Straßenbefestigungen in besonderem Maße zu. Als Ursache für diese bisher ungelöste Prognoseproblematik sind nach Schmuck [1987b] mehrere Gründe zu nennen.

Zum einen wird der Straßenzustand nicht anhand eines einzelnen Merkmals charakterisiert, sondern mit Hilfe einer bewertenden Verknüpfung von mehreren Zustandsmerkmalen, die zu einem Gesamtwert zusammengesetzt werden. Die Zustandsänderung jedes dieser Zustandsmerkmale variiert in Abhängigkeit von externen Einflussgrößen wie der Verkehrsbelastung und den klimatischen Bedingungen enorm. Zum anderen besteht die Problematik darin, dass weder die Verkehrsbelastung noch die Klimabeanspruchung konstante oder periodisch wiederkehrend konstante Werte darstellen [Schmuck 1987b].

Die Beanspruchung einer Straße kann weiterhin nur als Ergebnis des Zusammenwirkens vieler Einflussfaktoren gesehen werden, die idealerweise durch empirisch ermittelte Häufigkeitsverteilungen zu beschreiben sind. Sowohl die Formänderungs- als auch Festigkeitseigenschaften von Asphaltsschichten variieren maßgeblich in Abhängigkeit von der Kombination der einwirkenden Faktoren, sodass nach Schmuck [1987b] sowie Hinsch, Maerschalk und Pingel [1990] deren Verhalten in Form von idealisierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen darzustellen ist. Es liegt daher nahe, diesen Prozess aus mathematischer Sicht als stochastischen Prozess zu beschreiben, um die vorhandene Streuung in geeignetem Maße modellhaft abzubilden.

Bei einer Betrachtung des Straßenzustandes als Zufallsgröße in Abhängigkeit von unabhängigen und untereinander abhängigen Einflussgrößen kann das Verhalten einer Fahrbahnoberfläche mit Hilfe von wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansätzen modelliert und als zufälliger Prozess analysiert werden. Die Mehrzahl aller Parameter des Erhaltungsmanagements unterliegt einer gewissen Unsicherheit hinsicht-

lich ihrer Ausprägung und ihrer zukünftigen Entwicklung [Fastrich, Girmscheid 2010a]. Die zu beobachtenden Unsicherheiten bei Parametern zur Beschreibung von Zustandsentwicklungen, die teilweise vorhandene Subjektivität und Ungenauigkeit bei Zustandserfassungen sowie die stochastische Gesetzmäßigkeit führen zu einer großen Streuung der beobachteten Größen [Oefner 1985; Morcoux, Akhnoukh 2006].

Im Nachfolgenden wird ein Überblick zu den grundsätzlichen Modellierungsmöglichkeiten zur Analyse und Prognose der oben genannten Zusammenhänge gegeben.

### 3.3 Kategorisierung von Analyse- und Prognosemethoden

Die Analyse des Verhaltens eines Systems kann durch diverse Zustandsmodelle abgebildet werden, in denen das Verhalten in Zustände, Zustandsübergänge und Regeln für diese Zustandsübergänge dargestellt wird [Abele 2008]. Diese Modelle lassen sich u. a. nach zeit- und Zustandsdiskreten bzw. -kontinuierlichen, mechanistischen und empirischen, sowie deterministischen und probabilistischen Ansätzen differenzieren (vgl. Abbildung 28).

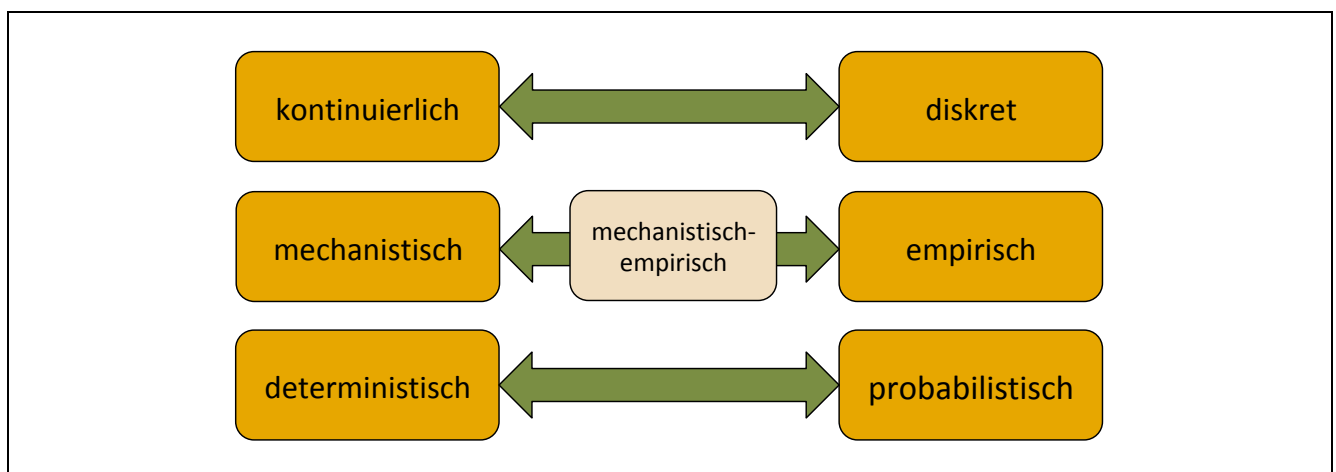


Abbildung 28: Kategorisierung von Analyse- und Prognosemodellen [Blumenfeld, Bald 2017]

#### 3.3.1.1 Kontinuierliche vs. diskrete Modelle

Nach Bortz [2005] kann die Beschreibung eines Merkmals bzw. einer Funktion sowohl mit kontinuierlichen (funktionalen) als auch mit diskreten (numerisch beschriebenen) Ausprägungen erfolgen. Weist ein Merkmal eine endliche Anzahl an Ausprägungen auf, so wird es als diskret bezeichnet. Falls sich in einem Merkmalsintervall hingegen beliebig viele Merkmalsausprägungen befinden, so wird von einem kontinuierlichen Merkmal gesprochen. Im Falle eines stetigen Merkmals, das aufgrund der Messpräzision nur diskret gemessen werden kann, wird dieses als quasi-stetiges Merkmal bezeichnet.

Beide Modellierungsvarianten beinhalten mehrere Vor- und Nachteile, die nach Bald [1991] wie folgt zusammengefasst werden können:

---

Bei einer **funktionalen Beschreibung** von Wahrscheinlichkeitsverteilungen wird die Verteilung mit Hilfe eines formelmäßigen Zusammenhangs beschrieben.

- + einfache Anwendung
- + Funktionsverläufe sowie theoretische Verteilungen lassen sich anhand von wenigen Parametern beschreiben, z. B. Normalverteilung anhand von Mittelwert  $\mu$  und Standardabweichung  $\sigma$
- + für einige Rechenoperationen sind die Ergebnisverteilungen bekannt
- Verteilungstyp muss vorab bekannt sein
- empirisch ermittelte Häufigkeitsverteilungen weisen oftmals keine theoretische Verteilung auf
- formelmäßige Beschreibung nur für wenige bestimmte Verteilungstypen und Rechenoperationen anwendbar

Bei einer **numerischen Beschreibung** von Wahrscheinlichkeitsverteilungen wird die Verteilung mit Hilfe einer Näherungsfunktion oder mit einer abschnittsweise gültigen Funktion beschrieben.

- + keine Voraussetzungen zum Verteilungstyp notwendig
- + empirisch ermittelte Eingangsgrößen sowie häufig vorkommende nichtlineare Zusammenhänge weisen oftmals keine Standardverteilungen auf
- + zahlreiche Verteilungen und Operationen sind formelmäßig nicht erfassbar
- komplexere Rechenoperationen für eine programmtechnische Umsetzung
- erhöhter Rechenaufwand bei Behandlung von Standardverteilungen mit Standardoperationen

Neben einer Differenzierung zwischen einer funktionalen oder einer numerischen Beschreibung eines Merkmals bzw. einer Funktion, ist weiterhin zwischen mechanistischen und empirischen Modellen zu unterscheiden.

### 3.3.1.2 Mechanistische vs. empirische Modelle

Die Entwicklung von Modellen zur Abschätzung des Langzeitverhaltens von Fahrbahnoberflächen kann sowohl mittels Langzeitbeobachtungen an Versuchsstrecken als auch im Labor anhand von Versuchsreihen erfolgen. Man unterscheidet hierbei zwischen rein empirischen und rein mechanistischen Modellen sowie der Kombination der beiden Modelltypen [Molzer, Felsenstein, Viertl, Litzka, Vycudil 2000].

Bei **empirischen Modellen** wird versucht, auf Basis von (Langzeit-)Beobachtungen von Straßen einen kausalen Zusammenhang zwischen verschiedenen Einflussgrößen (z. B. Befestigungsalter, kumulierte Belastung etc.) und der Zustandsänderung im Verlauf der Zeit abzubilden. Aufgrund von Langzeitbeobachtungen liegen mittlerweile umfangreiche empirische Erkenntnisse sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene vor [Ressel et al. 2013]. Zur Abschätzung des Langzeitverhaltens von Asphaltbefestigungen kommen bisher ausschließlich empirische Modelle zum Einsatz [Weninger-Vycudil 2001].

**Mechanistische bzw. analytische Modelle** berücksichtigen theoretische Überlegungen oder Laboruntersuchungen [Weninger-Vycudil et al. 2009]. Sie werden bisher nur als Hilfestellung für die Beurteilung verschiedener Einflussgrößen verwendet [Ressel, Benner, Wellner, Werkmeister, Lipke 2008; Weninger-Vycudil 2001; Oeser, Kemper, Wang, Vallée, Schneider 2014] und erfordern stets eine Kalibrierung mit Hilfe von empirisch ermittelten Grundlagen [Ressel et al. 2013].

### 3.3.1.3 Deterministische vs. probabilistische Modelle

Eine weitere Kategorisierung von Modellen besteht in der Unterscheidung zwischen deterministischen und probabilistischen Modellen.

Innerhalb des Erhaltungsmanagements haben sich seit einigen Jahren empirische Modelle etabliert, die sich je nach gewähltem statistischen Auswertungsverfahren in deterministische und probabilistische Modelle unterteilen lassen [Molzer et al. 2000]. Die Abschätzung der Zustandsentwicklung des Oberflächenzustandes wird in Deutschland bisher standardmäßig mit Hilfe von empirisch-deterministischen Verhaltensfunktionen getätigt [Ressel et al. 2013]. Für die Entwicklung von empirisch abgesicherten Verhaltensmodellen zur Zustandsprognose sind Straßenoberflächen mit eingeschränkter bzw. unterlassener Straßenerhaltung notwendig. Nach der deutschen Wiedervereinigung bot sich die Möglichkeit, Zustandsentwicklungen aus langjährig und netzweit erhobenen Straßendaten der DDR abzuleiten [Maerschalk, Rübensam 1992].

**Deterministische Modelle** zählen zu den am weitesten verbreiteten Ansätzen in PMS [Haas, Hudson, Zaniewski 1994]. Bei dieser Art von Modellen werden Verhaltensfunktionen explizit über Funktionsverläufe beschrieben. Die Idee von deterministischen Modellen besteht darin, das Verhalten von Asphaltbefestigungen in Abhängigkeit von verschiedenen Variablen durch eine spezifische Gleichung zu beschreiben (vgl. Abbildung 29). Zu den Vorteilen dieser Methode zählen sowohl die einfache Handhabbarkeit als auch deren einfache Verständlichkeit. Nicht zuletzt auch deswegen erfolgte die Implementierung solcher Verhaltensfunktionen u. a. im Highway Development and Maintenance Model (HDM 4) der Weltbank [Weninger-Vycudil, Samek, Rohringer 2008] und den deutschsprachigen Ländern. Das in Deutschland angewandte PMS beinhaltet deterministische, im Laufe der Jahre stets nachkalibrierte Verhaltensfunktionen [vgl. Maerschalk 1997; RPE-Stra 01; Weninger-Vycudil et al. 2009]. Auch in Österreich kamen bisher ausschließlich deterministisch-empirische Prognosemodelle zum Einsatz [Weninger-Vycudil et al. 2009].

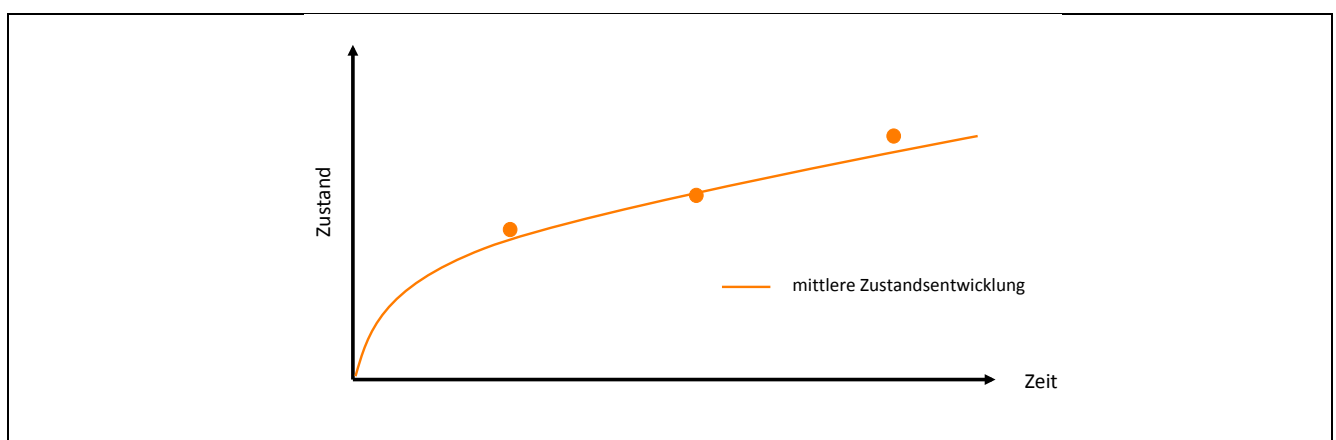


Abbildung 29: Deterministisches Prognosemodell [Blumenfeld, Bald 2017]

---

Trotz ihrer Vorteile und der großen Erfahrung in der Anwendung solcher Modelle handelt es sich jedoch um einen simplifizierenden Ansatz, da bei diesen Modellen keinerlei Unsicherheiten in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen berücksichtigt werden. Für den Entscheidungsträger geht dadurch eine wertvolle Betrachtungsweise verloren [Fastrich, Girmscheid 2010a]. Bei einer Anwendung von Verhaltensfunktionen können weder Messfehler noch Messtoleranzen abgebildet werden [Hinsch et al. 2005], sodass diese Art von Modellen zu einem zu stark vereinfachenden Ansatz zur Beschreibung von Zustandsveränderungen von Asphaltbefestigungen neigt [Yang 2004].

Im Zuge der Ermittlung von Verhaltensfunktionen ist stets zu diskutieren, inwieweit die bereits vorangeschrittene Zustandsentwicklung des Oberbaus miteinbezogen werden soll. Hierfür ist zu klären, inwiefern in die Vergangenheit zurückreichende Daten für Prognosefunktionen berücksichtigt werden können. Je weiter die Daten in der Vergangenheit zurückliegen, desto unsicherer ist in der Regel deren Übertragbarkeit in die Zukunft [Weninger-Vycudil et al. 2009]. Daraus folgt, dass Verfahren, die auf Zeitreihen basieren, wie bspw. Regressionsanalysen, sehr empfindlich auf die Geschichte reagieren und Zufallsereignisse die Ergebnisse stark verfälschen können.

Jede Einflussgröße unterliegt stochastischen Gesetzmäßigkeiten, sodass deterministische Ansätze lediglich eine willkürliche, von unendlich vielen Ausprägungen gewählte Abbildung der Zustandsentwicklung eines Systems darstellen. Dies impliziert, dass die Wahrscheinlichkeit einer Übereinstimmung zwischen tatsächlicher und prognostizierter Zustandsentwicklung gegen Null konvergiert. Aufgrund der teilweise vorhandenen Kollinearität zwischen den Einflussfaktoren, wie z. B. Verkehrsstärke und Aufbaudicke, sind einfache und multiple Regressionsanalysen ebenfalls nicht zielführend, um treffende Prognosen zu erstellen. Auch Yang, Gunaratne, Lu und Dietrich [2005] sowie Socina [2007] bezeichnen deterministische Modelle als nicht geeignet, die Oberflächeneigenschaften von Asphaltbefestigungen zu prognostizieren. Dies liegt zumeist an der vorhandenen Zufallscharakteristik der Zustandsentwicklung, wie z. B. bei der Rissbildung. Zustandsmerkmalübergreifende Vergleiche zeigen oftmals eine erhebliche Streuung der Abweichungen zwischen prognostizierten und gemessenen Zuständen auf, sodass nach Weninger-Vycudil, Brozek, Simanek und Litzka [2016] tiefergehende Untersuchungen zu empfehlen sind.

**Probabilistische Modelle** beziehen den Aspekt der Unsicherheit in die Prognose mit ein und ermöglichen eine differenziertere Betrachtung von Zustandsentwicklungen [Socina 2007; Weninger-Vycudil et al. 2009; Fergen, Hess, Roos 2014; Blumenfeld 2016]. Ein Vorteil probabilistischer Modelle liegt in der Möglichkeit, die naturgemäßen Unsicherheiten der Eingangsparameter, die Unschärfen innerhalb der Modelle und statistische Streuungen abzubilden [Leary, Hahn, Buchmann 1979; Lounis, Mirza 2001]. Dies ist sowohl bei der rechnerischen Dimensionierung von Fahrbahnbefestigungen [Oeser, Wellner, Zeißler, Kayser 2017] als auch insbesondere im Erhaltungsmanagement von Straßen von großer Relevanz, da die Zustandsentwicklung von Asphaltbefestigungen durch eine Vielzahl an Einflussfaktoren bestimmt wird, die jeweils großen Streuungen unterliegen [Li, Xie, Haas 1996; Oeser et al. 2014]. Da zudem eine Vielzahl an Faktoren nicht genau messbar oder quantifizierbar ist oder berücksichtigt werden kann, ist bei Befestigungen mit einem gleichen Aufbau und einer vergleichbaren Beanspruchung kein deterministischer Ausfallzeitpunkt zu beobachten [Wermuth 2012]. Die Abbildung 30 zeigt exemplarisch die Entwicklung eines Zustandsmerkmals mit Hilfe eines probabilistischen Prognosemodells.

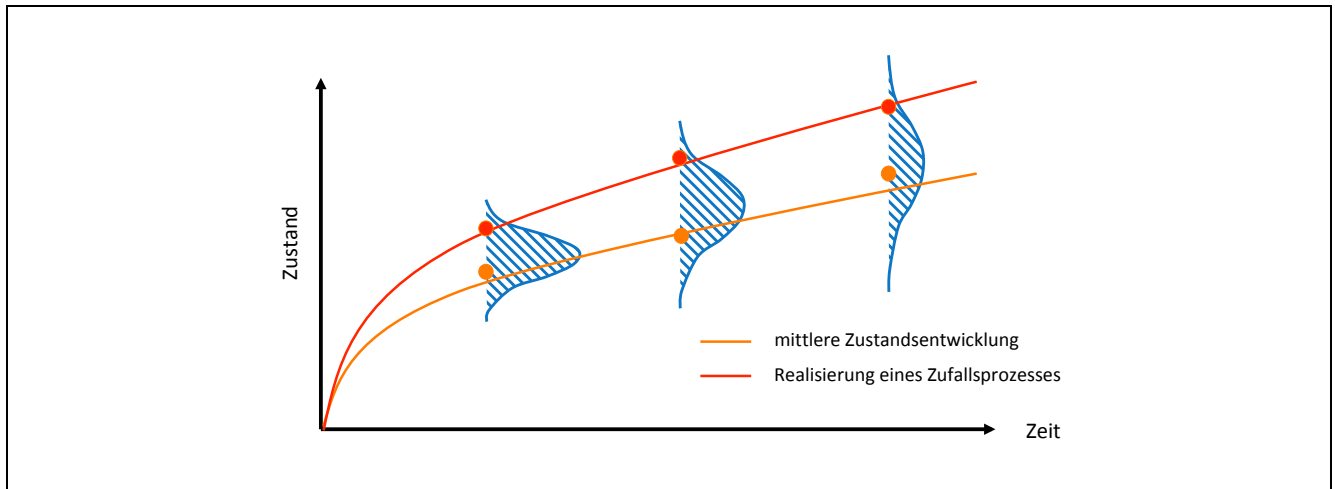


Abbildung 30: Probabilistisches Prognosemodell [Blumenfeld, Bald 2017]

Da sich probabilistische Modelle im Vergleich zu deterministischen Modellen als komplexer erweisen, sind auf diesem Gebiet bisher weniger Erfahrungen vorzuweisen. Solche Modelle benötigen große Mengen an Daten aus mehreren Messkampagnen, sodass diese bisher selten in PMS-Anwendungen implementiert wurden [Weninger-Vycudil et al. 2008; Scazziga 2008] (vgl. Abbildung 31).

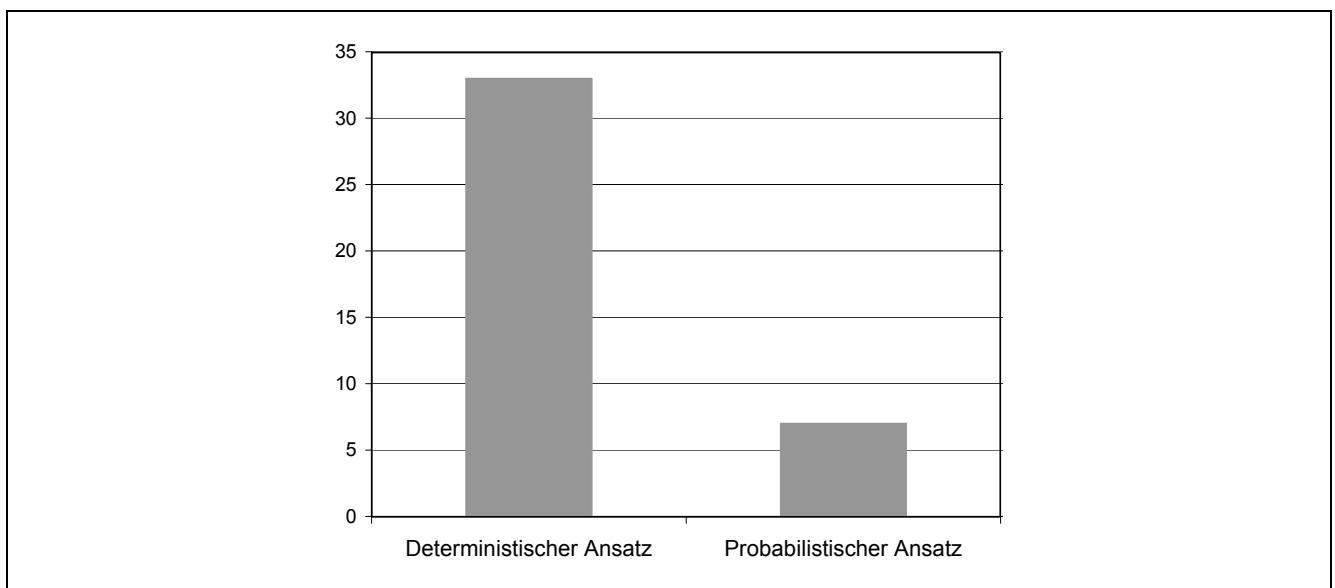


Abbildung 31: Absolute Häufigkeiten von deterministischen und probabilistischen Verhaltensmodellen aus einer Auswertung von Kongressbeiträgen internationaler Konferenzen zum Erhaltungsmanagement von Straßen (PMS) [in Anlehnung an Scazziga 2008]

In der Theorie ist anzustreben, möglichst alle Abhängigkeiten zu modellieren, um ein realistisches modellhaftes Abbild der Wirklichkeit zu erlangen. Dies wird jedoch nach Abele [2008] bei der wahr-scheinlichkeitstheoretischen Behandlung zu Schwierigkeiten führen, sodass in der Praxis auf der Netzebene meist eine Reduzierung der Modelle auf signifikante und erfassbare Einflussgrößen notwendig ist. Daraus resultiert jedoch oftmals eine erhebliche Reststreuung durch funktional nicht erklärbare Faktoren [Ressel et al. 2013]. Es sind daher geeignete Modelle zu verwenden, die die Ab-

bildung von ausreichend vielen Abhängigkeiten ermöglichen und gleichzeitig mathematisch nur so komplex wie nötig sind [Bossel 1991].

Die grundsätzliche Anwendbarkeit von probabilistischen Methoden zur Beantwortung von Fragestellungen innerhalb des Erhaltungsmanagements von Straßen wurde in den vergangenen Jahren zumindest im Rahmen von Vorstudien bereits untersucht. Neben der Anwendung der Survival-Analyse und den Bayes'schen Modellen ist insbesondere die Abbildung eines Markov-Entscheidungsproblems sowohl in der Straßenerhaltung [Socina 2007; Fastrich, Girmscheid 2010b; Wermuth 2012; Tabatabaee, Ziyadi 2013] als auch im Brückenmanagement [vgl. Thomas 2011; Mašović, Hajdin 2014] der am weitesten verbreitete probabilistische Ansatz. Die Grundlagen dieser drei Methoden werden im Folgenden erläutert.

### 3.4 Markov-Prozess

Als eine sowohl reichhaltige als auch geeignete Modellklasse zur Abbildung von stochastischen Prozessen sind Markov-Prozesse zu nennen. Diese finden seit Langem aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Komplexität in vielen Fachdisziplinen Anwendung.

#### 3.4.1 Mathematische Grundlagen

Markov-Ketten stellen einen zeit-diskreten stochastischen Prozess  $(X_n)_{n \in \mathbb{N}_0}$  mit abzählbarem Zustandsraum  $I$  dar, wenn für alle diskreten Zeitpunkte  $n \in \mathbb{N}_0$  und alle diskreten Zustände  $i_0, \dots, i_{n-1}, i_n, i_{n+1} \in I$  die sogenannte Markov-Eigenschaft erfüllt ist [Waldmann, Stocker 2013]. Diese beinhaltet die Annahme, dass die zukünftige Entwicklung des Prozesses nur von dem aktuellen Zustand abhängig ist und die vergangene Zustandsentwicklung keinen Einfluss auf den weiteren Verlauf des Prozesses hat. Ein Zustandsübergang innerhalb eines Zeitintervalls der Länge  $\Delta t$  hängt damit nur vom Zeitpunkt  $t$  ab und darf nicht von weiter zurückliegenden Zeitpunkten abhängen [Abele 2008]. Dementsprechend hängt die Wahrscheinlichkeit mit der die Zufallsvariable  $X_{n+1}$  den Wert  $i_{n+1}$  annimmt, nur von  $i_n$  ab. Als Übergangswahrscheinlichkeit wird hierbei die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n)$  bezeichnet, die die Wahrscheinlichkeit für einen Zustandswechsel von  $i_n$  nach  $i_{n+1}$  beschreibt:

Formel 9: Berechnung einer Übergangswahrscheinlichkeit von Zustand  $i$  nach Zustand  $j$

$$p_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_k N_{ik}}$$

mit:  $p_{ij}$  Übergangswahrscheinlichkeit von Zustand  $i$  nach Zustand  $j$

$N_{ij}$  Absolute Anzahl an Übergängen von Zustand  $i$  nach Zustand  $j$

$\sum_k N_{ik}$  Gesamtanzahl an Übergängen von Zustand  $i$

Die einzelnen Wahrscheinlichkeiten von den  $n$  möglichen Zustandsausprägungen zum Zeitpunkt  $i$  zu den  $n$  möglichen Zustandsausprägungen zum Zeitpunkt  $i + n$  können in Form einer Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix dargestellt werden (vgl. Tabelle 5). Die Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix ist eine stochastische Matrix. Dies bedeutet, dass die in ihr enthaltenen Einträge  $p_{ij}$  nichtnegativ und die Zeilensummen  $\sum_{j \in I} p_{ij} = 1$  sind [Fu, Devaraj 2008; Waldmann, Stocker 2013]. Die Anzahl an Reihen und Spalten bestimmt sich aus der Anzahl an definierten Zuständen [Labasch 2006].

Tabelle 5: Beispiel einer Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix

$p_{ij}$		Zustand zu Zeitpunkt $t + \Delta t$					
		1	2	3	4	...	j
Zustand zu Zeitpunkt $t$	1	$p_{11}$	$p_{12}$	$p_{13}$	$p_{14}$	...	$p_{1n}$
	2	$p_{21}$	$p_{22}$	$p_{23}$	$p_{24}$	...	$p_{2n}$
	3	$p_{31}$	$p_{32}$	$p_{33}$	$p_{34}$	...	$p_{3n}$
	4	$p_{41}$	$p_{42}$	$p_{43}$	$p_{44}$	...	$p_{4n}$
	...	...	...	...	...	...	...
	i	$p_{n1}$	$p_{n2}$	$p_{n3}$	$p_{n4}$	...	$p_{nn}$

Die Zustandsübergänge dieses Prozesses können mit Hilfe eines Übergangsgraphen veranschaulicht werden. Hierbei werden die einzelnen Zustände anhand von Punkten dargestellt. Die zwischen den Zuständen dargestellten Pfeile stellen die jeweilige Wahrscheinlichkeit dar, zwischen den verschiedenen Zuständen zu wechseln (vgl. Abbildung 32).

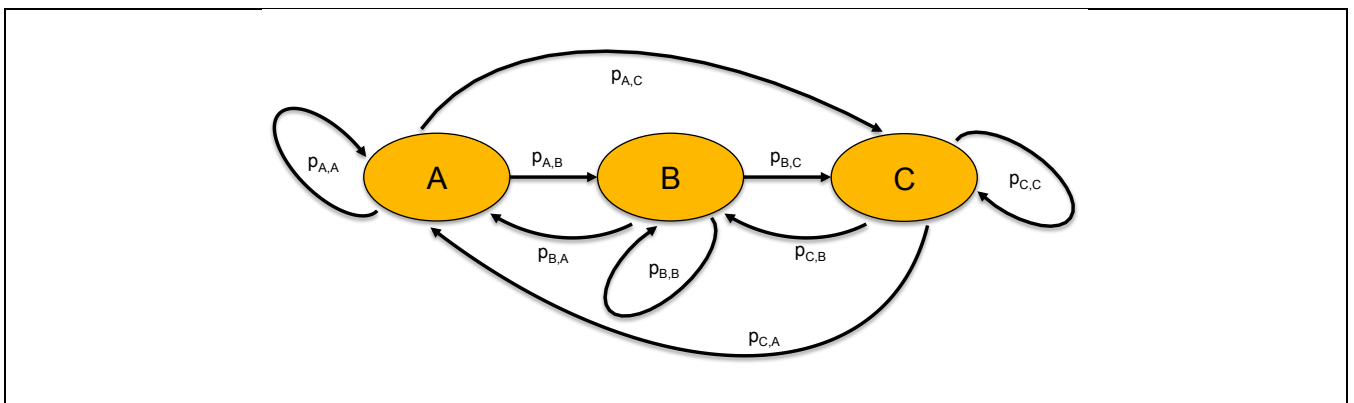


Abbildung 32: Grafische Darstellung eines Markov-Prozesses

Durch Multiplikation eines diskreten Zustandes  $i_0$  in Form eines Startvektors mit einer Übergangsmatrix  $P$  kann die zukünftige Zustandsverteilung ermittelt werden. Durch eine  $n$ -fache Multiplikation der Übergangsmatrix mit dem Startvektor lassen sich die Übergangswahrscheinlichkeiten beschreiben als:

Formel 10: Übergangswahrscheinlichkeiten innerhalb einer Transitionsmatrix

$$a_t = a_0 P^n$$

- mit:
- $a_t$  Zustandsvektor zum Zeitpunkt  $t$
  - $a_0$  Zustandsvektor zum Zeitpunkt  $t = 0$
  - $P$  Übergangsmatrix
  - $n$  Anzahl der Zeitschritte



---

Je nach Methodik zur Konzipierung von Übergangsmatrizen kann zwischen verschiedenen Variationen der Markov-Prozesse differenziert werden [Vanclay 1994]. Demnach lassen sich Markov-Prozesse nach homogenen, inhomogenen, Semi-Markov-Prozessen und Hidden Markov-Prozessen kategorisieren.

### 3.4.2 Homogener Markov-Prozess

Bei homogenen Markov-Prozessen sind die Übergangswahrscheinlichkeiten konstant und unabhängig vom Zeitpunkt  $n$  des Übergangs. Der auch als Markov-Kette erster Ordnung bezeichnete Ansatz gilt als die weltweit am häufigsten angewandte Variation von Markov-Ketten [Fastrich, Girmscheid 2010b] und wird nach Hoffmann [2019] insbesondere für Simulationen, Parameterstudien und die Optimierung von Investitionsstrategien auf der Netzebene eingesetzt.

Ein wesentlicher Vorteil des homogenen Markov-Prozesses besteht darin, dass als benötigte Datengrundlage lediglich Zustandsdaten zu zwei Messzeitpunkten vorliegen müssen [Fu, Devaraj 2008]. Weitere Informationen zu endogenen und exogenen Einflussfaktoren sind nicht zwingend notwendig [Iwojlow 2014].

Die Übergangsmatrix einer homogenen Markov-Kette wird durch eine einzige stochastische stationäre Matrix abgebildet [Usher 1981]. Der Aspekt der Zeithomogenität besagt, dass ein gegebener Zustand  $i$  stets auf die gleiche weitere zeitliche Evolution des Prozesses, egal zu welchem Zeitpunkt  $i$ , eintritt [Abele 2008].

Die Verweildauer in einem definierten Zustand ist bei homogenen Markov-Ketten symmetrisch um den Erwartungswert verteilt. Das Verweilen lässt sich demzufolge als Bernoulli-Experiment mit Erfolgswahrscheinlichkeit interpretieren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Übergangswahrscheinlichkeit nur vom aktuellen Zustand und weder von den vorherigen Zuständen noch von der Verweildauer im aktuellen Zustand abhängig ist. Ist die Eigenschaft gegeben, dass jeder Zustand von jedem anderen Zustand erreichbar ist, wird dies als irreduzible homogene Markov-Ketten bezeichnet.

Die Annahme von stationären Übergangswahrscheinlichkeiten sehen Lytton [1987], Li [1997] sowie Fu und Devaraj [2008] als kritisch, da dadurch Ereignisse, wie z. B. klimatische Veränderungen, die die Zustandsentwicklung einer Straße beeinflussen, nicht abgebildet werden. Lytton [1987] sieht hingegen inhomogene und Semi-Markov-Prozesse als deutlich bessere Möglichkeit eine Zustandsentwicklung zu beschreiben, da diese es ermöglichen, durch zeitlich variierende Einflussfaktoren, wie z. B. Verkehrs- und Klimadaten, hervorgerufene Änderungen in der Zustandsentwicklung abzubilden.

### 3.4.3 Inhomogener Markov-Prozess

Markov-Prozesse müssen nicht immer zeithomogen sein. Als eine Verallgemeinerung des homogenen Markov-Prozesses kann der inhomogene Markov-Prozess bezeichnet werden [Abele 2008]. Dies bedeutet, dass die Übergangswahrscheinlichkeiten innerhalb einer Matrix nicht stationär, sondern in Abhängigkeit exogener Einflussfaktoren beschrieben werden. Als Einflussfaktoren können beliebige Variablen verwendet werden. Je Einflussfaktor werden dann verschiedene Gruppen gebildet, von denen jeweils ein homogenes Zustandsverhalten angenommen wird. Für jede Gruppe wird eine eigene Übergangsmatrix erstellt. Die Vorgehensweise bei einer Untergliederung in Teilmodelle basiert auf dem Gedanken eines Kohortenmodells. Hierbei wird eine Stichprobe zunächst in verhaltenshomogene Gruppen unterteilt und anschließend für jede dieser Gruppen deren zeitliche Entwicklung prognostiziert. Durch die Erweiterung der Dimensionen wird zugleich die Granularität des Modells erhöht.

---

Eine spezielle Variation der inhomogenen Markov-Kette ist dann gegeben, wenn die Übergangswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit des Zeitpunktes des Übergangs variieren. Dies bedeutet, dass die Übergangsmatrix als Funktion in Abhängigkeit der Zeit dargestellt wird [Fu, Devaraj 2008]. Dieser Modelltyp eignet sich zum Beispiel für die Abbildung von Alterungs- und Verschleißeffekten, die zu zeitabhängigen Fehlerraten führen [Abele 2008]. Je nach Anzahl der berücksichtigten vorherigen Zustandsausprägungen kann sich die Komplexität des inhomogenen Markov-Prozesses stark erhöhen. Wenn der zukünftige Zustand von den  $n$ -letzten Zustandsausprägungen abhängt, wird von einer Markov-Kette  $n$ -ter Ordnung gesprochen [Fastrich, Girmscheid 2010b]. In diesem Fall ist die zuvor beschriebene Markov-Eigenschaft nicht mehr erfüllt, sodass nur noch bedingt von einem Markov-Prozess gesprochen werden kann.

#### **3.4.4 Semi-Markov-Prozess**

Als eine weitere Variation des Markov-Prozesses sind Semi-Markov-Prozesse zu nennen. Diese Verallgemeinerung der homogenen und inhomogenen Fälle wurde durch Lévy [1954], Takács [1954] und Smith [1955] erstmals vorgestellt. Bei diesem Ansatz ist die Wahrscheinlichkeit, einen Zustand  $i$  zu verlassen, zusätzlich von der Aufenthaltsdauer im aktuellen Zustand bedingt.

Bei Semi-Markov-Prozessen verbleibt der Prozess innerhalb des aktuellen Zustandes für eine variierende Verweildauer, bevor er in einen anderen Zustand wechselt [Bortot, Zonta, Zandonini 2006; Ibe 2009]. Die Übergangswahrscheinlichkeiten sind in diesem Fall Funktionen beliebiger Verweildauerverteilungen [Abele 2008]. Die Markov-Eigenschaft ist immer nur dann erfüllt, wenn der Prozess in einen neuen Zustand übergeht. Als Verweilzeit wird die Zeitspanne bezeichnet, zwischen der ein Systemelement eine Zustandsklasse zum ersten Mal erreicht und diese anschließend wechselt [Thomas, Sobanjo 2016].

Im Vergleich zu den homogenen Markov-Ketten, bei denen die Verweildauer exponentiell bzw. geometrisch verteilt ist, wird die Verweilzeit als Zufallsvariable mit beliebiger Verteilung gesehen, die sowohl von dem aktuellen als auch von dem Folgezustand abhängig ist [Thomas 2011]. Der wesentliche Unterschied von Semi-Markov-Prozessen zu den traditionellen homogenen Markov-Prozessen besteht somit in der Gestalt der Verteilungsfunktion der Verweilzeit innerhalb einer Zustandsklasse, bevor ein Klassenwechsel stattfindet [Ng, Moses 1998; Sobanjo 2011; Black, Brint, Brailsford 2005a; Black, Brint, Brailsford 2005b].

Die Verweilzeiten können mit Hilfe von z. B. der Survival-Analyse abgeleitet werden, wofür als Datengrundlage mindestens drei Erfassungszeitpunkte vorliegen müssen [Ng 1996, Ng, Moses 1999, Howard 1971]. Weitere verallgemeinerte Ansätze können durch die Kombination der zuvor dargestellten Modelle entwickelt werden. So können durch logistische Regressionen Übergangswahrscheinlichkeiten geschätzt werden, die aufgrund von fehlenden oder nicht ausreichenden Klassenbesetzungen nicht anhand von empirischen Daten ermittelt werden können.

#### **3.4.5 Hidden-Markov-Prozess**

Eine zusätzliche Erweiterung der zuvor beschriebenen Markov-Prozesse stellen Hidden-Markov-Prozesse dar. Analog zu den anderen Markov-Prozessen beschreiben sie einen stochastischen Prozess mit einer endlichen Anzahl an möglichen Zuständen, die in diskreten, äquivalenten Zeitschritten durchlaufen werden [Ghahramani 2001].

---

Hidden-Markov-Modelle (HMM) zeichnen sich insbesondere darin aus, dass die innerhalb eines Systems vorhandenen Zustände nicht direkt beobachtbar, sondern nur anhand einer Sequenz von Beobachtungszeitpunkten sichtbar sind. Dadurch gliedern sie sich in eine versteckte und eine beobachtbare Komponente, die jeweils anhand eines stochastischen Prozesses modelliert werden.

Die Modellierung des versteckten Systemverhaltens erfolgt mit Hilfe eines stochastischen Prozesses, der zumeist mit einer homogenen Markov-Kette erster Ordnung realisiert wird [Brandherm 2006]. Weitere Variationen von HMM mit inhomogenen Markov-Ketten  $n$ -ter Ordnung sind ebenfalls möglich [Zucchini, MacDonald 2011]. Die verschiedenen Ausprägungen an Beobachtungen werden ebenso als zufällige Ausprägung der versteckten Zustände mit Hilfe eines weiteren stochastischen Prozesses modelliert [Rabiner 1989] für den eine unimodale lineare gaußsche Wahrscheinlichkeitsverteilung angenommen wird [Brandherm 2006].

HMM sind eine allgemeine probabilistische Methode in der statistischen Modellierung sequenzieller Daten oder Zeitreihen, die aufgrund ihrer großen Flexibilität und praktischen Handhabbarkeit in zahlreichen Anwendungsgebieten erfolgreich eingesetzt werden [Knab 2000].

Im Allgemeinen kann die Modellierung jedoch auch mit stetigen Prozess- und Verteilungsfunktionen erfolgen [Wichern 2001], sodass HMM eine spezielle Ausprägung eines diskret beschriebenen Dynamischen Bayes'schen Netzes darstellen (vgl. Kapitel 3.6.3) [Ghahramani 2001].

### 3.5 Survival-Analyse

Neben den weitverbreiteten Markov-Modellen ist die Survival-Analyse als weitere probabilistische Methode zu nennen. Die Methodik der Survival-Analyse stammt ursprünglich aus dem Bereich der industriellen Fertigung von Bauteilen und wurde später in der medizinischen Forschung angewendet. Ein wesentliches Merkmal besteht darin, dass die Überschreitung eines zu definierenden Qualitätsniveaus einer Fahrbahnoberfläche als „Ausfall“ bezeichnet wird [Klinghammer et al. 1997]. Es erfolgt hierbei lediglich eine Differenzierung, ob ein zu definierendes Qualitätsniveau innerhalb eines Zeitraumes überschritten wurde.

Klassische Zeitreihenanalysen sind dadurch gekennzeichnet, dass die verwendeten Daten meist einer „Zensur“ unterliegen [Glomb 2007]. Die Problematik der Datenzensur resultiert aus einem begrenzten Beobachtungsfenster der gesamten Lebensdauer [Rimpler 1997]. Das grundsätzliche Problem der Datenzensur beschreibt die Tatsache, dass Straßenabschnitte mit größeren Liegezeiten zunehmend erneuert werden, sodass für die Prognose des Straßenzustandes prinzipiell weniger Daten in den höheren Altersklassen vorliegen. Dies bedeutet, dass die Belastbarkeit der Daten in diesen Altersklassen wesentlich geringer ausfällt. Hinzu kommt, dass die ehemals alten Abschnitte durch Erneuerung eine fiktive Liegezeit von 0 Jahren erhalten. Wäre hingegen zwischenzeitlich keine Erhaltungsmaßnahme durchgeführt worden, dann wäre dieser Datensatz mit einer weiter steigenden Liegezeit und einem zusätzlichen Zuwachs an Schadenszunahme für die Prognose enthalten. Durch die Umsetzung von Erhaltungsmaßnahmen kommt es daher aus datenanalytischer Sicht zu einer Zensur der Zustandsdaten, die erhebliche Auswirkungen auf die Abschätzung der Restnutzungsdauer von Straßenbefestigungen darstellt. Dies führt dazu, dass die prognostizierten Lebensdauern von Fahrbahnen häufig über- oder unterschätzt werden. Aufgrund dieser unvollständigen Datengrundlage können nach Glomb [2007] die statistischen Standardverfahren zur Analyse solcher Zeitreihen nicht verwendet werden, sondern erfordern die Anwendung von besonderen Auswertemethoden [Klinghammer et al. 1997].

### 3.5.1 Mathematische Grundlagen

Die Zuverlässigkeitsfunktion (oder auch Überlebensfunktion)  $R(t)$  ist eine wesentliche Größe bei der Beschreibung von Lebenszeiten [Glomb 2007]. Sie lässt sich in Abhängigkeit der Ausfallwahrscheinlichkeit  $F(t)$  wie folgt beschreiben:

Formel 11: Zuverlässigkeitsfunktion

$$R(t) = 1 - F(t)$$

mit:  $R(t)$  Zuverlässigkeitsfunktion (Survival Curve)

$F(t)$  Ausfallwahrscheinlichkeit (Probability of Failure)

Die Überlebenswahrscheinlichkeit fällt mit voranschreitender Zeit von 100 % auf 0 % ab und stellt den Anteil an Straßenabschnitten dar, bei denen die Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen bisher nicht notwendig war. Eine typische Zuverlässigkeitsfunktion  $F(t)$  sowie die zugehörige Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(t)$  sind in Abbildung 33 abgebildet.

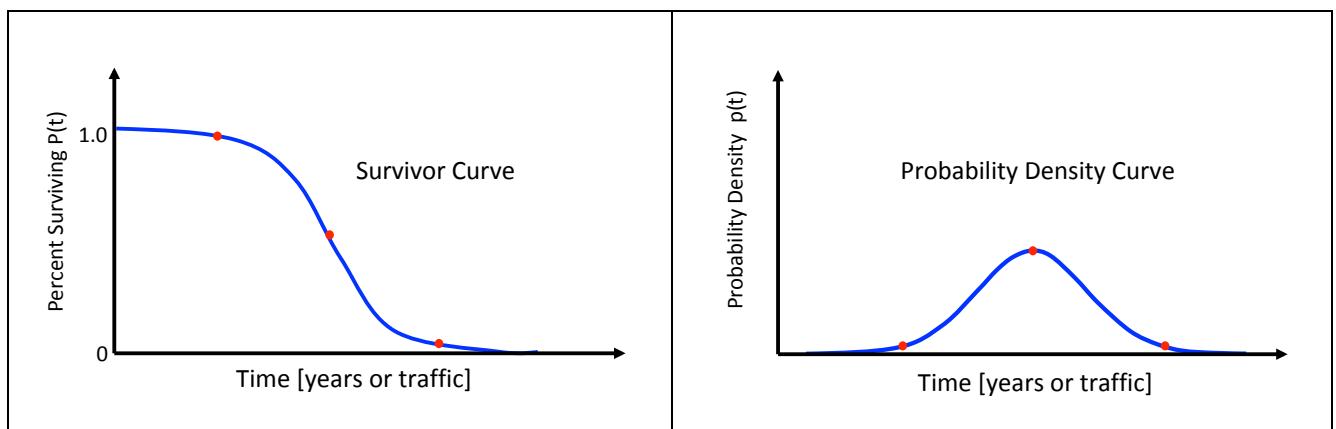


Abbildung 33: Survivor Curve (links) und zugehörige Dichtefunktion (rechts) der Überlebenswahrscheinlichkeit [nach Lytton 1987]

Die Hazard-Funktion  $h(t)$  beschreibt die Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der zeitabhängigen Zuverlässigkeitsfunktion  $R(t)$  und der Ausfalldichte  $f(t)$ :

Formel 12: Hazard-Funktion

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

mit:  $h(t)$  Hazardfunktion (Ausfallrate)

$f(t)$  Ausfalldichte (Failure Density Function)

$F(t)$  Ausfallwahrscheinlichkeit (Probability of Failure)

$R(t)$  Zuverlässigkeitsfunktion (Survival Function)

Im einfachsten Fall wird von einer über die Zeit konstanten Fehlerrate ausgegangen. In Bezug auf Straßenzustandsdaten eignet sich hingegen eher die Verwendung einer Weibull-Verteilung, da mit steigender Liegezeit die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls ansteigt. Hierzu kann die Hazard-Funktion wie folgt beschrieben werden:

Formel 13: Weibullverteilte Hazard-Funktion mit variierender Fehlerrate

$$h(t) = m \cdot \lambda \cdot t^{m-1}$$

mit:  $h(t)$  Hazardfunktion (Ausfallrate)  
 $t$  Zeit  
 $\lambda$  Skalenparameter der Weibullverteilung  
 $m$  Formparameter der Weibullverteilung

Die zuvor beschriebene Problematik der Datenzensur kann mit Hilfe von Survival-Analysen gelöst werden. Um eine Überschätzung der Überlebenszeit zu vermeiden, müssen die zensierten Daten modifiziert werden. Dies kann mit Hilfe einer nicht-parametrischen Kaplan-Meier-Schätzung erfolgen, die sich wie folgt beschreiben lässt:

Formel 14: Kaplan-Meier-Schätzung für die Überlebensfunktion

$$\hat{S}(t) = \prod_{t_{(i)} \leq t} \frac{n_i - d_i}{n_i}$$

mit:  $\hat{S}(t)$  Kaplan-Meier-Schätzer für die Überlebensfunktion  
 $n_i$  Anzahl an beobachteten Elementen zum Zeitpunkt  $t_i$  unter Risiko  
 $d_i$  Anzahl an Ausfällen zum Zeitpunkt  $t_i$

Die Methodik der Survival-Analyse ist ein vergleichsweise einfaches Verfahren, um die Lebensdauer einer Straße abzuschätzen. Der Vorteil dieser Methode liegt insbesondere in der Möglichkeit des Umgangs mit der Zensur von Zustandsdaten. Diese Problematik trifft jedoch nur auf solche Zustandsmerkmale zu, die innerhalb des betrachteten Analysezeitraums die kritischen Warn- und Schwellenwerte erreichen oder überschreiten bzw. solche, die die ursächliche Begründung zur Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen waren.

### 3.6 Bayes'sche Statistik

Eine weitere bedeutende Methodik zur probabilistischen Modellierung stellt, neben dem Markov-Prozess und der Survival-Analyse, die Bayes'sche Statistik dar. Die Bayes'sche Statistik bietet eine alternative statistische Sichtweise im Vergleich zur klassischen schließenden Statistik. Sie findet vor allem in den Bereichen der Technik und der künstlichen Intelligenz Anwendung. Während die klassische Statistik zur Parameterschätzung und zum Testen von Hypothesen nur die vorliegende Stichprobe verwendet, erlaubt die Bayes'sche Statistik hingegen eine Berücksichtigung von zusätzlichen Informationen und Annahmen [Tschirk 2014].

### 3.6.1 Mathematische Grundlagen

Die Bayes'sche Statistik gründet auf dem Bayes'schen Theorem zur Berechnung von bedingten Wahrscheinlichkeiten von unbekannten Ereignissen  $E$  oder einer Hypothese  $H$ . Es beschreibt den Zusammenhang zwischen zwei bedingten Ereignismengen  $E$  und  $H$  [Neumann 2002] und lässt sich anhand folgender Formel beschreiben als:

Formel 15: Satz von Bayes

$$p(H|E) = \frac{p(E|H) \cdot p(H)}{p(E)}$$

mit: $p(H E)$	a posteriori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Ereignisses $H$ unter der Bedingung, dass $E$ eingetreten ist
$p(H)$	a priori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für das Eintreten des Ereignisses $H$
$p(E H)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Ereignisses $E$ unter der Bedingung, dass $H$ eingetreten ist
$p(E)$	a priori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für das Eintreten des Ereignisses $E$

Der Satz von Bayes beschreibt den Rückschluss von einer Beobachtung  $E$  auf ein unbekanntes Ereignis  $H$ . Dazu wird anhand einer a posteriori ermittelten Wahrscheinlichkeitsverteilung eine Wahrscheinlichkeit für den Eintritt des Ereignisses  $H$  angegeben, welches auf einer tatsächlichen Realisierung von  $E$  fundiert [Garcia 2014]. Die Bayes'sche Statistik kombiniert damit eine a priori vorgegebene Wahrscheinlichkeitsverteilung  $H$  zum Eintritt eines Ereignisses mit den beobachteten tatsächlichen Realisierungen  $E$ .

Dieser Ansatz stellt eine grundsätzliche Abgrenzung zur klassischen Statistik dar, da die Wahrscheinlichkeitsaussagen der klassischen Statistik auf allen denkbaren Ausprägungen von  $E$  beruhen. Im Gegensatz dazu wird bei der Bayes'schen Statistik eine beobachtete tatsächliche Realisierung betrachtet. Die a priori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $p(H)$  beschreibt den Wissensstand zu  $H$  vor Durchführung einer Beobachtung. Der Wissensstand nach der Beobachtung von  $E$  wird durch die a posteriori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $p(H|E)$  beschrieben. Anhand einer Likelihood-Funktion wird die Wahrscheinlichkeit der Vereinbarkeit der Beobachtung mit der zuvor angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $H$  modelliert. Die Normierungskonstante  $p(E)$  dient dem Zweck, dass die Summe der Wahrscheinlichkeiten der a posteriori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion 1 ergibt. Das Bayes'sche Theorem bildet die Grundlage für eine Reihe an Modellvariationen der Bayes'schen Statistik, die im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

### 3.6.2 Bayes'sche Netze

Ein gerichteter, azyklischer Graph wird als ein Bayes'sches Netz bezeichnet [Pearl 1988]. Dieser Graph bildet die Wahrscheinlichkeitsverteilung des unsicheren Wissens innerhalb eines Modells mit Hilfe von Knoten und Kanten grafisch ab. Die Knoten bilden Zufallsvariablen ab. Die direkten stochastischen Abhängigkeiten zwischen den Variablen werden durch Kanten dargestellt. Mit Hilfe von Bayes'schen

Netzen kann unsicheres Wissen modelliert und verarbeitet werden. Dabei werden Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Größen anhand von Wahrscheinlichkeiten beschrieben [Brandherm 2006]. Sie zählen zu den wichtigsten probabilistischen Ansätzen innerhalb des Forschungsbereichs künstlicher Intelligenz und bilden die wesentlichen Modelltypen von Graphischen Modellen. Für eine Analyse von Zustandsentwicklungen sind Bayes'sche Netze aufgrund ihrer statischen Natur nur bedingt geeignet [Brandherm 2006]. Das Prinzip von bedingten Wahrscheinlichkeiten kann jedoch auch auf dynamische Systeme übertragen werden. Damit erfolgt eine Schätzung der Systemzustände eines sich fortlaufend ändernden Systems auf Basis von messabweichungsbehafteten Beobachtungen. Die Anwendung solcher dynamischen Analysen auf Zeitreihen erfolgt anhand von dynamischen Bayes'schen Netzen.

### 3.6.3 Dynamische Bayes'sche Netze

Dynamische Bayes'sche Netze verknüpfen Bayes'sche Netze über diskrete Zeitschritte. Sie zählen aufgrund ihrer Modularität und flexiblen Anwendbarkeit zu den bedeutendsten und effizientesten Methoden zur Modellierung und Verarbeitung unsicheren Wissens [Brandherm 2006; Kohlhaas Sze-keresch, Gindele, Dillmann 2009]. Mit jeder Beobachtung innerhalb eines neuen Zeitschrittes wird ein weiteres Bayes'sches Netz an das bestehende Bayes'sche Netz angefügt, sodass die Rechenkomplexität des Bayes'schen Netzes stetig zunimmt. Während die Struktur des Bayes'schen Netzes über alle Zeitschritte konstant bleibt, ändern sich die beliebig modellierbaren Wahrscheinlichkeitsverteilungen der jeweiligen Zufallsvariablen [Kohlhaas et al. 2009]. Die System- und Messgleichungen können sowohl anhand von stetigen als auch numerisch anhand von diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben werden. Je nach Anwendungsfall können Bayes'sche Netze sowohl zur Glättung von Zeitreihen, zur Filterung von aktuellen Daten als auch zur Prognose verwendet werden.

Ein Überblick zu den verschiedenen Varianten dynamischer Bayes'scher Netze bzw. Bayes'scher Filter ist in der Abbildung 34 gegeben.

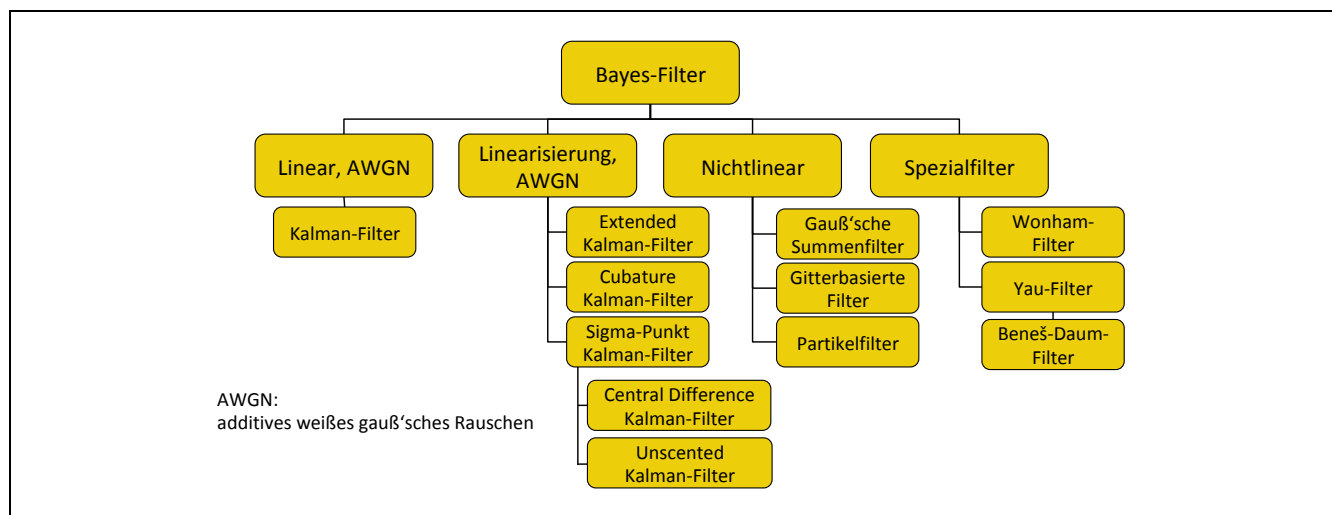


Abbildung 34: Varianten dynamischer Bayes'scher Netze [Garcia 2014]

Variationen dynamischer Bayes'scher Netze erlauben die Modellierung mit Hilfe von zeitinvarianten und beliebig verteilten Übergangsfunktionen. Die Modellierung kann beliebig komplex gestaltet werden, sodass auch Markov-Annahmen höherer Ordnung berücksichtigt werden können [Kohlhaas et al. 2009]. Zu den bekanntesten Varianten dynamischer Bayes'scher Netze zählen Hidden Markov Modelle (HMM) (vgl. Kapitel 3.4.5) und das Kalman-Filter (KF).

### 3.6.4 Kalman-Filter

Das Kalman-Filter (KF) ist ein statistisches Verfahren, welches die vergangenen, aktuellen und zukünftigen Zustandsausprägungen eines Systems anhand von Beobachtungen und eines angenommenen Systemverhaltens abschätzen kann [Kalman 1960]. Im Nachfolgenden werden die Grundgleichungen in Anlehnung an Heunecke [1995], Welsch, Heunecke, Kuhlmann [2000] und Ramm [2008] vorgestellt.

Das KF basiert im Wesentlichen auf zwei Berechnungsschritten. Der erste Berechnungsschritt beinhaltet die Prognose des zukünftigen Systemzustandes vom aktuellen in den nächsten Zeitschritt (Systemgleichung). Während des zweiten Berechnungsschrittes erfolgt der Abgleich des prognostizierten Zustandes mit dem Messergebnis zum aktuellen Zeitpunkt (Messgleichung). Die Systemgleichung beschreibt die Änderung eines Zustandes zwischen zwei Messzeitpunkten:

Formel 16: Systemgleichung

$$\tilde{x}_{k+1} = T_{k+1,k} \cdot \tilde{x}_k + B_{k+1,k} \cdot \tilde{u}_k + C_{k+1,k} \cdot w_k$$

mit:	$\tilde{x}_{k+1}$	Systemzustand zum Zeitpunkt k+1
	$\tilde{x}_k$	Systemzustand zum Zeitpunkt k
	$T_{k+1,k}$	Transitionsmatrix zwischen Zeitpunkt k und Zeitpunkt k+1
	$\tilde{u}_k$	Stellgröße
	$B_{k+1,k}$	Stellgrößenmatrix
	$w_k$	Prozessrauschen (Störgröße) zum Zeitpunkt k
	$C_{k+1,k}$	Störgrößenmatrix

Die Transitionsmatrix  $T$  beschreibt die ungestörte Zustandsänderung zwischen den beiden Messzeitpunkten  $t_k$  und  $t_{k+1}$ . Anhand der externen Stellgröße  $\tilde{u}_k$  und der Stellgrößenmatrix  $B$  kann ein deterministischer äußerer Einfluss auf die Zustandsänderung abgebildet werden. Mit Hilfe der Störgröße  $w_k$  und der Störgrößenmatrix  $C$  werden stochastische äußere Fehlereinflüsse, d. h. Abweichungen zwischen dem Modell und der Realität, abgebildet, deren Erwartungswert bei einer stochastischen Berücksichtigung zu 0 angenommen wird [Eichhorn 2005]. Die in der Systemgleichung enthaltene Matrix  $C$  wird als zeitinvariant angenommen, sodass diese im Folgenden ohne Indizes geschrieben wird. Der wahre Zustandsvektor  $\tilde{x}_k$  ist fehlerbehaftet, sodass sich nach Einsetzen dieser fehlerbehafteten Größe in obige Gleichung nach Schrick [1977] und Heunecke [1995] folgende Systemgleichung für die Prädiktion des ungestörten Zustandes ergibt:



Formel 17: Systemgleichung zur Prädiktion

$$\bar{x}_{k+1} = T \cdot \hat{x}_k + C \cdot w_k$$

mit:	$\bar{x}_{k+1}$	Systemzustand zum Zeitpunkt k+1
	$\hat{x}_k$	Systemzustand zum Zeitpunkt k
	$T$	Transitionsmatrix
	$w_k$	Prozessrauschen (Störgröße) zum Zeitpunkt k
	$C$	Störgrößenmatrix

Die zur Systemgleichung zugehörige Kovarianzmatrix der Prädiktion  $\sum_{\bar{x}\bar{x},k+1}$  ergibt aus der Kovarianzmatrix des Ausgangszustandes  $\sum_{\hat{x}\hat{x},k}$  und der Kovarianzmatrix des Prozessrauschens  $\sum_{ww,k}$  zu:

Formel 18: Kovarianzmatrix der Prädiktion (I)

$$\sum_{\bar{x}\bar{x},k+1} = T \cdot \sum_{\hat{x}\hat{x},k} \cdot T^T + C \cdot \sum_{ww,k} \cdot C^T = T \cdot P_k \cdot T^T + Q_k$$

mit:	$\sum_{\bar{x}\bar{x},k+1}$	Kovarianzmatrix der Prädiktion zum Zeitpunkt k+1
	$\sum_{\hat{x}\hat{x},k}$	Kovarianzmatrix des Ausgangszustandes zum Zeitpunkt k
	$T$	Transitionsmatrix
	$\sum_{ww,k}$	Kovarianzmatrix des Prozessrauschens zum Zeitpunkt k
	$C$	Störgrößenmatrix

Für den Zeitpunkt einer Messung wird eine Messgleichung verwendet, die den funktionalen Zusammenhang zwischen den innerhalb des Systems vorliegenden Zuständen  $\tilde{x}_{k+1}$  und den fehlerbehafteten Beobachtungen  $m_{k+1}$  in Form von Messungen und einem Messrauschen wiedergibt. Sie lässt sich beschreiben als:

Formel 19: Messgleichung

$$m_{k+1} = A \cdot \tilde{x}_{k+1} + \varepsilon_{k+1}$$

mit:	$m_{k+1}$	Messergebnis zum Zeitpunkt k+1
	$\tilde{x}_{k+1}$	Systemzustand zum Zeitpunkt k+1
	$A$	Messmatrix
	$\varepsilon_{k+1}$	weißes Messrauschen zum Zeitpunkt k+1

Die darin enthaltene Konfigurations- bzw. Messmatrix  $A$  transformiert die Zustände zwischen Zustands- und Beobachtungsraum unter Berücksichtigung eines zufälligen Messrauschens  $\varepsilon_{k+1}$ . Die Differenz zwischen dem zum Zeitpunkt  $t_{k+1}$  prognostizierten Zustand  $\bar{x}_{k+1}$  und der im Beobachtungsraum vorliegenden Beobachtung  $m_{k+1}$  wird als Innovation bezeichnet und beschreibt sich zu:

Formel 20: Differenz zwischen Prädiktion und Beobachtung

$$d_{k+1} = m_{k+1} - A \cdot \bar{x}_{k+1}$$

mit:  $d_{k+1}$  Innovation zum Zeitpunkt  $k+1$   
 $m_{k+1}$  Messergebnis zum Zeitpunkt  $k+1$   
 $\bar{x}_{k+1}$  Systemzustand zum Zeitpunkt  $k+1$   
 $A$  Messmatrix

Die Kovarianzmatrix der Innovation berechnet sich aus der Kovarianz der Prädiktion und der Kovarianz der Beobachtung, dem sogenannten Messrauschen, zu:

Formel 21: Kovarianzmatrix der Innovation

$$\sum_{dd,k+1} = H_j \cdot \sum_{\bar{x}\bar{x},k+1} \cdot H_j^T + \sum_{mm,k+1} = H_j \bar{P}_{k+1} H_j^T + E\{\varepsilon_{k+1} \varepsilon_{k+1}^T\}$$

mit:  $\sum_{dd,k+1}$  Kovarianzmatrix der Innovation zum Zeitpunkt  $k+1$   
 $\sum_{\bar{x}\bar{x},k+1}$  Kovarianzmatrix der Prädiktion zum Zeitpunkt  $k+1$   
 $H_j$  Jacobimatrix  
 $\sum_{mm,k+1}$  Kovarianzmatrix des Messrauschens zum Zeitpunkt  $k+1$

Nach einer Überprüfung der Übereinstimmung zwischen Prädiktion und Beobachtung, die eine zentrale Rolle innerhalb des KFs darstellt [Eichhorn 2005], wird die optimale Schätzung für den aktuellen Zustand berechnet. Die hierfür benötigte Verstärkungsmatrix  $K$ , das sogenannte Kalman-Gain, verknüpft die beiden aus Prädiktion und Beobachtung gewonnenen Erwartungswerte in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Varianz [Arenknecht 2015]. Das Kalman-Gain beschreibt somit, wie stark die Innovation gewichtet wird. Es berechnet sich zu:

Formel 22: Verstärkungsmatrix

$$K_{k+1} = \sum_{\bar{x}\bar{x},k+1} \cdot A^T \sum_{dd,k+1}^{-1} = \frac{\bar{P}_{k+1} H_j^T}{H_j \bar{P}_{k+1} H_j^T + \varepsilon_{k+1}}$$

mit:  $K_{k+1}$  Kalman-Gain zum Zeitpunkt k+1  
 $\sum_{\bar{x}\bar{x},k+1}$  Kovarianzmatrix der Prädiktion zum Zeitpunkt k+1  
 $A$  Messmatrix  
 $\sum_{dd,k+1}$  Kovarianzmatrix der Innovation zum Zeitpunkt k+1

Die optimale Schätzung des Zustandes ist die Kombination aus der Prädiktion und der mit der Verstärkungsmatrix  $K$  gewichteten Differenz aus Beobachtung und Prädiktion. Sie berechnet sich zu:

Formel 23: Optimale Schätzung des Zustandes

$$\hat{x}_{k+1} = \bar{x}_{k+1} + K_{k+1} \cdot [m_{k+1} - A \cdot \bar{x}_{k+1}] = \bar{x}_{k+1} + K_{k+1} \cdot d_{k+1}$$

mit:  $\hat{x}_{k+1}$  optimale Schätzung des Zustandes zum Zeitpunkt k+1  
 $\bar{x}_{k+1}$  Systemzustand zum Zeitpunkt k+1  
 $K_{k+1}$  Kalman-Gain zum Zeitpunkt k+1  
 $m_{k+1}$  Messergebnis zum Zeitpunkt k+1  
 $A$  Messmatrix  
 $d_{k+1}$  Innovation zum Zeitpunkt k+1

Die zugehörige Kovarianzmatrix der optimalen Schätzung  $\sum_{\hat{x}\hat{x},k+1}$  ergibt aus der Kovarianz der Prädiktion  $\sum_{\bar{x}\bar{x},k+1}$  und der Kovarianz der Innovation  $\sum_{dd}$  :

Formel 24: Kovarianzmatrix der optimalen Schätzung

$$\sum_{\hat{x}\hat{x},k+1} = \sum_{\bar{x}\bar{x},k+1} - K_{k+1} \cdot \sum_{dd,k+1} \cdot K_{k+1}^T = (I - K_{k+1} \cdot H_j) \bar{P}_{k+1}$$

mit:  $K_{k+1}$  Kalman-Gain zum Zeitpunkt k+1  
 $\sum_{\hat{x}\hat{x},k}$  Kovarianzmatrix der optimalen Schätzung zum Zeitpunkt k+1  
 $\sum_{\bar{x}\bar{x},k+1}$  Kovarianzmatrix der Prädiktion zum Zeitpunkt k+1  
 $\sum_{dd,k+1}$  Kovarianzmatrix der Innovation zum Zeitpunkt k+1

Anhand der zuvor beschriebenen System- und Messgleichungen ist die Modellstruktur beschrieben und eine optimale Schätzung eines Zustands(-verlaufs) kann erfolgen. In der nachfolgenden Abbildung 35 ist die Modellstruktur des KF grafisch dargestellt.

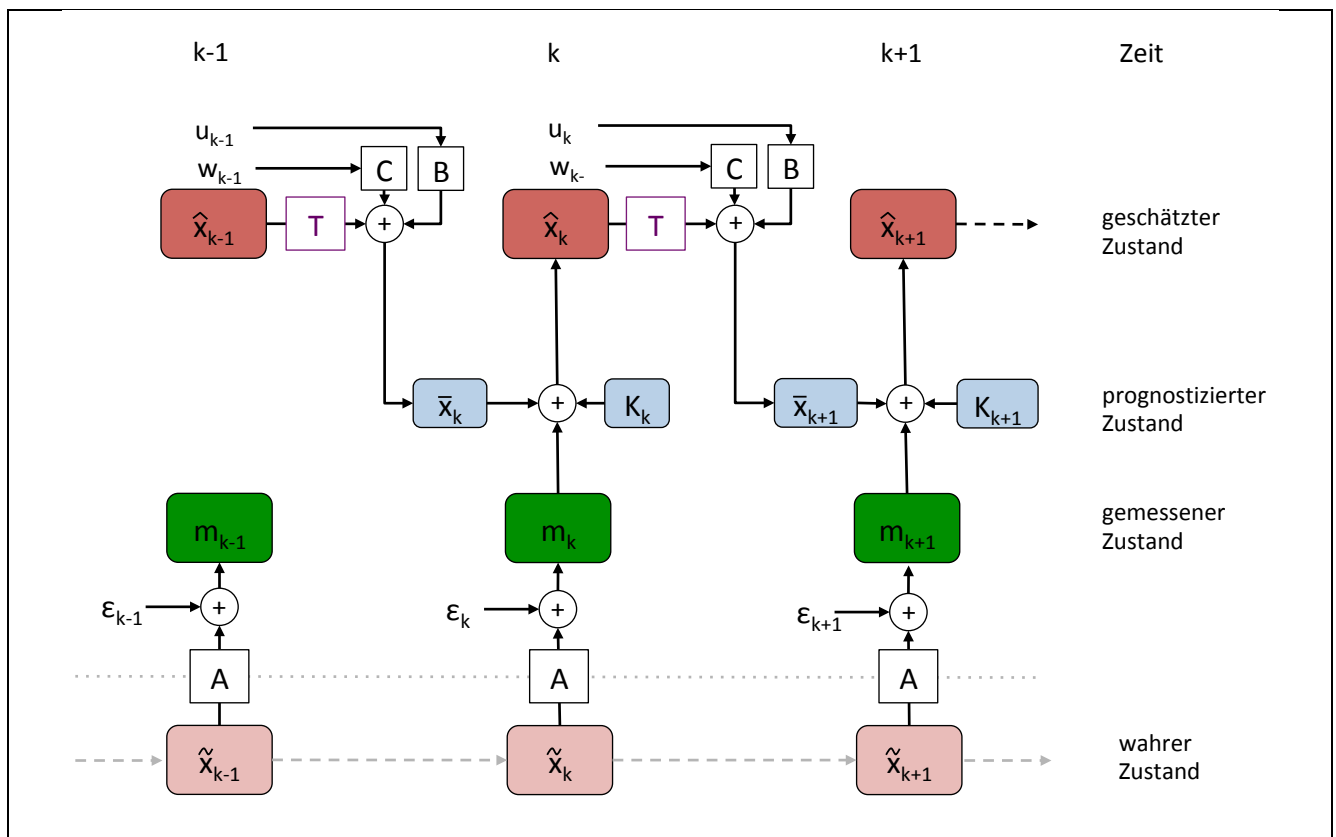


Abbildung 35: Modellstruktur des Kalman-Filters (KF)

Im nachfolgenden Unterkapitel 3.7 wird eine Übersicht zu den bisherigen Erkenntnissen aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen der zuvor vorgestellten Methoden gegeben.

### 3.7 Bisherige Methodenanwendungen

Die Sichtung der Literatur zeigt, dass für eine Modellierung der Zustandsentwicklung grundsätzlich mehrere probabilistische Methoden zur Verfügung stehen. Die Anwendung dieser Methoden wurde in unterschiedlichen Wissenschafts- und Wirtschaftsfachdisziplinen in den vergangenen Jahren bereits erprobt.

Auf internationaler Ebene werden insbesondere im angelsächsischen Sprachraum seit etwa Anfang der 1990er Jahre probabilistische Prognose- und Analysemethoden dazu verwendet, die Zustandsentwicklung von Infrastruktursystemen unter Berücksichtigung von Unsicherheit abzubilden.

Trotz ihres aufgezeigten Potentials wurde die Anwendung von probabilistischen Methoden innerhalb des systematischen Erhaltungsmanagements von Straßen auf nationaler Ebene bisher nur vereinzelt geprüft. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick zu den bisher national und international durchgeführten probabilistischen Untersuchungen und zeigen hierbei insbesondere die Vor- und Nachteile des Markov-Prozesses, der Survival-Analyse und der Bayes'schen Statistik auf.

---

### 3.7.1 Anwendungen des Markov-Prozesses

Eine Analyse von internationalen Publikationen zeigt, dass die Anwendung diverser Variationen des Markov-Prozesses zur probabilistischen Prognose der Zustandsentwicklung einzelner Bauteile oder gesamter Infrastrukturnetze seit etwa der Mitte der 1980er Jahre praktiziert wird. Die Anwendung dieser Methode erfolgte stets mit dem Ziel, Ausfallwahrscheinlichkeiten von Systemen(-komponenten), wie z. B. von Brückenelementen [Bortot et al. 2006; Hajdin, Peeters 2008], Leitungen der Wasserver- und entsorgung und Windkraftanlagen zu modellieren [vgl. Jiang, Sinha 1990; Ariaratnam, El-Assaly, Yang 1991; Cesare, Santamaria, Turkstra, Vanmarcke 1992; Golabi, Thompson, Hyman 1993; Micevski, Kuczera, Coombes 2002; Mishalani, Madanat 2002; Baik, Seok, Abraham 2006; Wellalage, Zhang, Dwight 2014]. Ein Überblick zu diesen bisher angewendeten Ansätzen sowie den jeweiligen Vor- und Nachteilen wird in dem nachfolgenden Abschnitt gegeben.

Für die Ermittlung der Übergangswahrscheinlichkeiten innerhalb des Markov-Prozesses kommen prinzipiell zwei Methoden in Frage. Bei Vorliegen von zwei Zustandserfassungen ist es möglich, die Übergangswahrscheinlichkeiten anhand von empirischen Daten zu ermitteln. Im zweiten Fall liegen keine Informationen zum Zustand der Brückenelemente vor, sodass geeignete Schätzverfahren zur Anwendung kommen [Jiang, Saito, Sinha 1988; Cesare et al. 1992]. Letztere wurden bereits mehrmals erfolgreich angewendet [Klein 1962; Carnahan, Davis, Shahin, Keane, Wu 1987; Jiang et al. 1988; Madanat, Ben-Akiva 1994; Thompson, Small, Johnson, Marshall 1998]. Bei der Schätzung von Übergangswahrscheinlichkeiten können Annahmen zugrunde gelegt werden, wie z. B., dass der Zustand eines Elements sich maximal um eine Zustandsklasse innerhalb eines Zeitintervalls verschlechtern kann und keine Abhängigkeit zwischen dem Alter des (Brücken-)Elements und den Übergangswahrscheinlichkeiten besteht [Bortot et al. 2006].

#### Anwendungsbeispiele des homogenen Markov-Prozesses

Eine der ersten **Anwendungen von homogenen Markov-Prozessen** erfolgte bereits in der Mitte des 20. Jahrhunderts von Leslie [1945, 1948] zur Beschreibung der Altersentwicklung einer Tier-Population. Howard [1960] entwickelte ein auf einem Markov-Entscheidungsprozess basierendes Verfahren für die Abschätzung der Lebensdauern von Schweine- und Rinderbeständen. Die in den 1960er Jahren weiterentwickelte und erstmals 1963 angewendete Methode wurde als Lösungsansatz für eine Vielzahl an Entscheidungsfindungsproblemen verwendet [Kristensen 1996].

Homogene Markov-Prozesse fanden in der Forstwirtschaft ebenfalls Anwendung [Hool 1966], um die Zustandsentwicklung von Waldbeständen zu prognostizieren. Grundlage hierfür waren die von Buckman [1962] und Clutter [1963] entwickelten Wachstumsmodelle zur Prognose des Waldzustandes. Nach Vanclay [1994] können in den stationären Übergangsmatrizen alle Indikatoren des Wachstums und der Änderung eines Waldbestandes abgebildet werden. Markov-basierte Wachstumsmodelle von Baumbeständen wurden bereits sowohl für einzelne Baumarten [vgl. Rudra 1968; Bruner, Moser 1973] als auch für Mischwälder [vgl. Stephens, Waggoner 1970; Sloboda 1976; Vanclay 1991] entwickelt.

Eine der ersten Anwendungen des homogenen Markov-Prozesses auf Straßenzustandsdaten erfolgte bereits von Bellman [1955], der diesen Prozess für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen anwendete. Golabi et al. [1982] nutzen den homogenen Markov-Prozess ebenfalls für die Entwicklung eines PMS in Arizona. Homogene Markov-Ketten fanden bereits in der Mitte der 1990er Jahre in zahlreichen PMS in den USA Anwendung [Wang 1992, Wang, Zaniewski, Way 1994]. Mittlerweile verwenden

---

mehrere Departments of Transportation (DOT), wie z. B. die Bundesstaaten Ohio, Mississippi und Pennsylvania, innerhalb ihrer PMS Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen, um Schadensfälle vorherzusagen [Zavitski, Piane 2015]. Der Großteil der nordamerikanischen Straßenbauverwaltungen, die Markov-Modelle innerhalb ihrer PMS implementiert haben, verwenden hierbei stationäre Übergangswahrscheinlichkeiten [Yang et al. 2005].

Die erstmalige exemplarische Anwendung des Markov-Prozesses auf Straßenzustandsdaten in Deutschland erfolgte in Koch [1992]. In den Untersuchungen wurde die grundsätzliche Anwendbarkeit eines probabilistischen Prognosemodells zur Abschätzung der Zustandsänderung eines Straßennetzes geprüft. Die Prognose des Netzzustandes erfolgte anhand des Gesamtwertes, welcher aus der gewichteten Verknüpfung verschiedener Oberflächenmerkmale gebildet wird (vgl. Kapitel 2). Die Ergebnisse zeigten, dass sich das entwickelte Modell grundsätzlich für eine netzweite Prognose von Zustandsänderungen eignet. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Modell mit den Erkenntnissen der BAST ergab jedoch nur teilweise eine gute Übereinstimmung der Schädigungsraten im Vergleich zu anderen Straßennetzen. Auch in der Schweiz wurde von Fastrich und Girmscheid [2010a] ein probabilistisches Verfahren zur Simulation der Erhaltungsoptimierung auf der Basis einer Kombination von Markov-Ketten und einer Monte-Carlo-Simulation entwickelt.

Homogene Markov-Ketten können sowohl für die Prognose einzelner Zustandsmerkmale, wie z. B. dem Rissbild [Nasseri, Gunaratne, Yang, Nazef 2009] und der Längsebenheit [Solorio, Flintsch, Garnica, Moreno 2017], als auch anhand eines zusammengesetzten Gesamtwertes [Wermuth 2012] Anwendung finden. Des Weiteren können neben messtechnisch durchgeführten Zustandserfassungen auch visuell [Samek 2005; Donev 2014] erfasste Oberflächenmerkmale als empirische Datengrundlage dienen.

In einer Studie von Yang [2012], in der sowohl die bauliche Erhaltung als auch der Ausbau eines Straßennetzes Berücksichtigung finden, wurde ein Prognosemodell entwickelt, welches ebenfalls auf stationären Übergangswahrscheinlichkeiten basiert. Für die Instandsetzung, die Erneuerung sowie für den Neubau wurde jeweils eine eigene Übergangsmatrix mit Hilfe von Expertensystemen geschätzt. Des Weiteren wurden homogene Übergangsmatrizen in Abhängigkeit der prognostizierten Zunahme der Verkehrsstärke entwickelt.

Die große Anzahl an Anwendungsbeispielen ist insbesondere auf die **vorteilhaften Eigenschaften** des Markov-Prozesses zurückzuführen. Nach Fastrich und Girmscheid [2010a] und Iwojlow [2014] sind Markov-Ketten ideal für eine diskrete, probabilistische Modellierung des Straßenzustandsverlaufs geeignet. Socina [2007] konstatiert, dass eine Visualisierung von aus ZEB-Daten abgeleiteten absoluten und relativen Übergangshäufigkeiten als wertvolle Vergleichsbasis genutzt werden kann, um Aussagen über die Netzentwicklung zu treffen. Einen Vorteil der Methode sehen Oeser et al. [2014] zusätzlich darin, dass der Effekt von Erhaltungsmaßnahmen innerhalb einer Übergangsmatrix abgebildet werden kann. Für die Entwicklung einer homogenen Markov-Kette sind keine vertieften theoretischen Kenntnisse über die mechanistischen Schadensprozesse sowie keine Annahmen über den Zustandsverlauf, Ausfall- und Zustandsverteilung erforderlich [Fastrich und Girmscheid 2010a; Thomas, Sobanjo 2016]. Sie können daher als eine Art „Black Box“ angesehen werden, für die Ergebnisse aus lediglich zwei Zustandserfassungen mit einem zeitlich konstanten Erfassungsintervall vorliegen müssen. Liegt nur eine Messkampagne vor, ist es trotzdem möglich mit Hilfe von Expertenbefragungen die Übergangswahrscheinlichkeiten abzuschätzen. Homogene Markov-Ketten sind mathematisch wenig anspruchsvoll, schnell mit geringem Rechenaufwand zu berechnen und erlauben

die Anwendung von netzweiten Optimierungsalgorithmen. Die resultierende Zustandsverteilung ist grafisch anschaulich darstellbar und leicht nachzuvollziehen [Donev, Hoffmann 2017].

Anhand der Erkenntnisse aus den dargestellten Anwendungen des homogenen Markov-Prozesses auf Straßenzustandsdaten wurden jedoch zugleich einige **Nachteile** erkennbar, die eine Anwendung von homogenen Markov-Ketten für die Zustandsprognose von einer Vielzahl an Systemen als nicht zielführend erscheinen lassen.

Für die Anwendung von Markov-Prozessen wird eine ausreichend **große Datenbasis** benötigt, damit sämtliche Klassen besetzt werden und die Übergangswahrscheinlichkeiten abgeleitet werden können. Dies ist oftmals bei der Verwendung einer empirischen Datengrundlage problematisch [Bossel 1991]. Sobald einzelne Klassen eine Wahrscheinlichkeit von Null beinhalten, bedeutet dies nicht zwangsläufig, dass die darin beschriebene Wahrscheinlichkeit gleich Null ist, sondern ist oftmals auf eine zu geringe Datengrundlage zurückzuführen [Oeser et al. 2014]. Um die Übergangswahrscheinlichkeiten zu ermitteln, sind die Verwendung eines Expertensystems sowie die Hinzunahme weiterer ingenieurmäßiger Annahmen denkbar. So bieten bspw. die von Lesli [1948], Usher [1979], Butt, Shahin, Feighan, Carpenter [1987] sowie Abaza [2017] entwickelten Matrizen die Möglichkeit auch mit nicht besetzten Zustandsklassen umzugehen, da beide Ansätze die Anzahl an möglichen Klassenübergängen beschränken, sodass eine geringere Anzahl an Werten für die Generierung einer Matrix benötigt wird.

Eine weitere Problematik des Markov-Prozesses wird in der erheblichen Anzahl an beobachteten **Zustandsverbesserungen** gesehen. So wurde von Socina [2007], trotz eines großen manuellen Aufwands zur Gewinnung einer plausibilitätsgeprüften Datenbasis, ein auffallend hoher Anteil an Zustandsverbesserungen des untersuchten Zustandsmerkmals Spurrinnentiefe festgestellt (vgl. Abbildung 36).

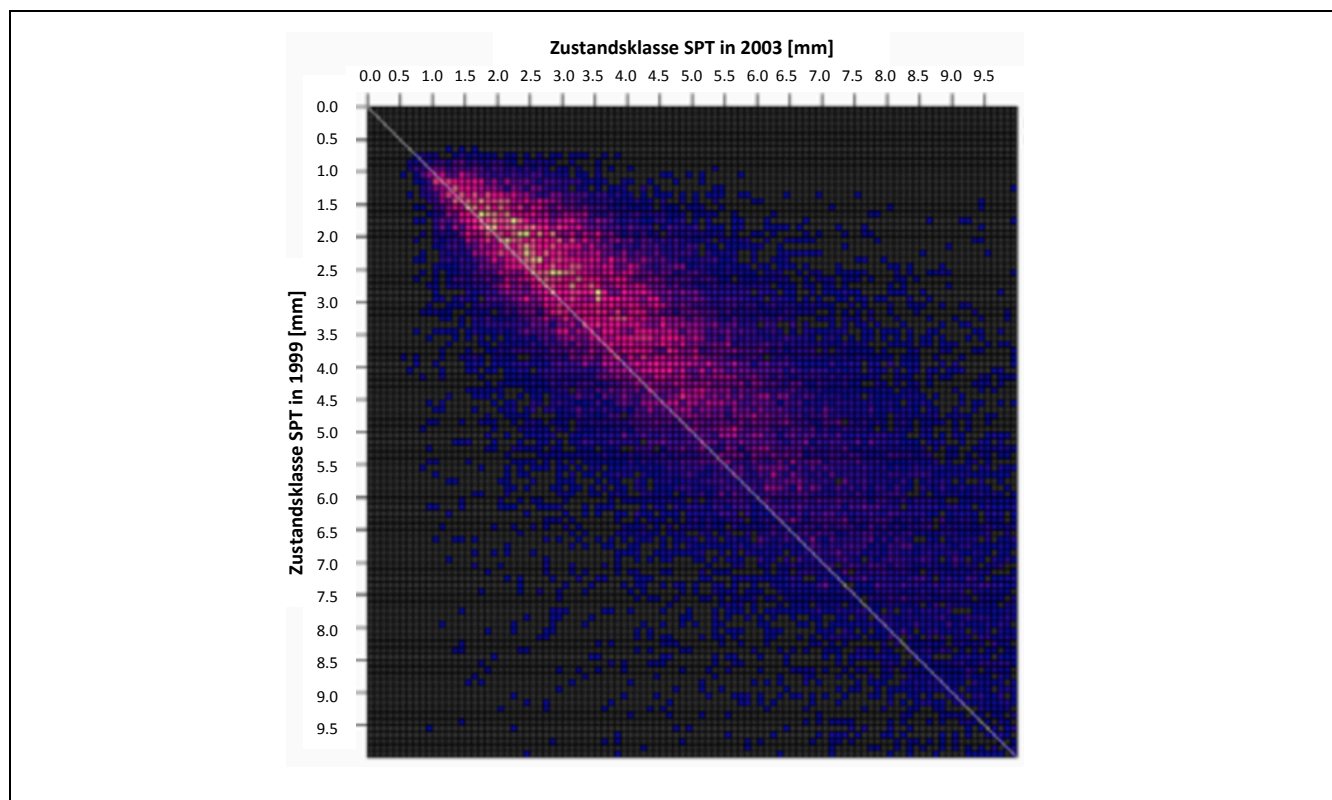


Abbildung 36: Absolute Übergangshäufigkeiten für die Zustandsgröße Spurrinnentiefe mit einer Klassenbreite von 0,1 mm [Socina 2007]

Diese Beobachtungen wurden bereits in vorherigen sowie darauffolgenden Studien zu Zustandsdynamiken festgestellt [vgl. z. B. Hinsch et al. 2005; Heller, Socina, Rübensam 2006; Heller, Komma, Maerschalk, Nagel, Schniering 2006; Hess, Fergen, Ochsenreither, Temme 2013; Donev 2014; Iwojlow 2014]

In einer von Hess et al. [2013] durchgeführten Untersuchung von ZEB-Daten deutscher Bundesautobahnen wurden anhand des Gesamtwertes annähernd gleich große Anteile an Zustandsverschlechterungen und -verbesserungen innerhalb von vier Jahren beobachtet (vgl. Abbildung 37).

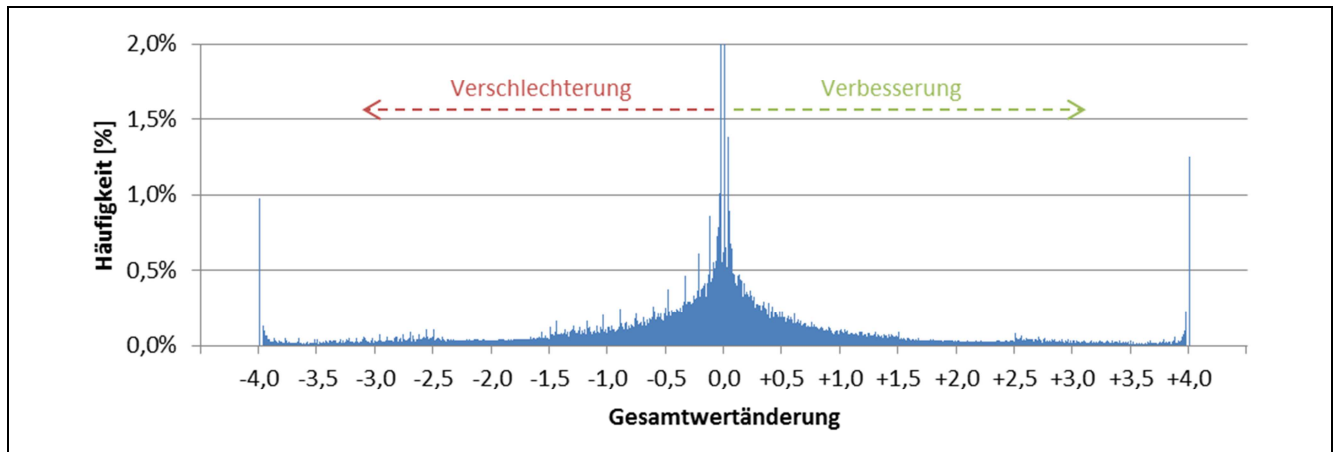


Abbildung 37: Veränderung der Gesamtwerte in vier Jahren auf Bundesautobahnen in Asphaltbauweise [Hess et al. 2013]

Nach Socina [2007] und Hess et al. [2013] deutet der auffallend hohe Anteil an beobachteten Zustandsverbesserungen auf eine nicht plausible Streuung der Zustandswerte hin, die vermutlich durch den Effekt von Erhaltungsmaßnahmen, ein Messrauschen der Erfassungssysteme und durch die Eigenheit der Messwerteverarbeitung und -auswertung hervorgerufen wird.

Um den Anteil an beobachteten Zustandsverbesserungen zu reduzieren, wird die Datengrundlage oftmals von Abschnitten mit zwischenzeitlich durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen bereinigt, sofern hierfür die notwendigen Informationen netzweit vorliegen. Diese Überprüfung ist bisher nur mit einem erheblichen manuellen Aufwand verbunden [Donev 2014] und führt, trotz großer Sorgfalt bei der Datenaufbereitung, oftmals nur zu einer geringen Reduzierung des Anteils an beobachteten Zustandsverbesserungen [Blumenfeld 2016].

Mit Hilfe von statistischen Tests (Sign-Test) versuchten Solorio, Flintsch, Garnica und Moreno [2017] zu prüfen, ob eine Erhaltungsmaßnahme zwischen zwei Erfassungszeitpunkten durchgeführt wurde. Diese Untersuchungen lieferten allerdings keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

Aufgrund der vielfältigen Ursachen für beobachtete Zustandsverbesserungen werden in der Literatur die zahlreichen betroffenen Datensätze oftmals als „unplausibel“ eingestuft und von weiteren Analysen ausgeschlossen [Socina 2007]. Wermuth [2012], Iwojlow [2014] und Donev [2014] argumentieren hierzu, dass „ohne einen Eingriff von außen in Form einer Erhaltungsmaßnahme eine Verbesserung des Zustands unmöglich sei“ [Wermuth 2012, S. 82]. Auch in den Untersuchungen von Hess et al. [2013] wurden für die Erstellung von Übergangsmatrizen sämtliche Zustandsverbesserungen ohne Berücksichtigung weiterer Analysemethoden aus der Stichprobe entfernt.



---

Aus statistischer Sicht sind solche Zustandsverbesserungen jedoch legitim, da die Erfassung der Zustandsmerkmale natürlichen (zufälligen) Streuungen unterworfen sind und dadurch um den wahren Wert der gemessenen Größe schwanken. Ein systematischer Ausschluss betroffener Datensätze führt bei der Erstellung von Übergangsmatrizen zu einer erheblichen Verzerrung der Übergangswahrscheinlichkeiten und dadurch zu einer Überschätzung der Schadenszunahme bei der Zustandsprognose (vgl. Kapitel 5.5).

Die Hauptkritik des Markov-Prozesses ist insbesondere in der als „**Markov-Eigenschaft**“ bezeichneten Voraussetzung der „Gedächtnislosigkeit“ zu sehen. Diese impliziert, dass Straßenabschnitte mit einer überdurchschnittlich schnellen Schadenszunahme im nächsten Zeitschritt die gleiche Schädigungswahrscheinlichkeit wie ein durchschnittlicher Straßenabschnitt aufweisen. Der mit dem homogenen Markov-Prozess prognostizierte mittlere Zustandsverlauf wird unabhängig des betrachteten Zustandsmerkmals als linearer Schadenszuwachs beschrieben, sodass sich oftmals Restlebensdauern ergeben, die deutlich von den in der Literatur [vgl. z. B. RPE-Stra 01] bekannten Werte abweichen.

Jeffers [1978], Hulst [1979] und Binkley [1980] erläutern weiterhin, dass für die Zustandsprognose von **inhomogenen Systemen** mit vielen, sehr unterschiedlich ausgeprägten Elementen ein einfacher probabilistischer Ansatz, wie z. B. der homogene Markov-Prozess, nicht geeignet sei, da die Übergangswahrscheinlichkeiten je nach den Eigenschaften eines einzelnen Elements stark variieren können. Diesem kann jedoch durch alternative, z. B. inhomogene und instationäre Markov-Prozesse Rechnung getragen werden. Hess et al. [2013] verweisen hierzu auf Markov-Ketten höherer Ordnung und Semi-Markov-Ketten, mit denen eine realistischere Prognose von Nutzungsdauern von Fahrbahnen möglich ist, da sie neben dem aktuellen Zustand auch zum Teil die bisherige Zustandsentwicklung berücksichtigen.

Dies zeigt, dass homogene Markov-Ketten nicht für die Modellierung der Lebensdauer von Bauteilen mit einem kontinuierlichen Schädigungsprozess geeignet sind [Li et al. 1996; Donev 2014; Hoffmann, Donev 2016; Thomas, Sobanjo 2016; Abaza 2017]. Im nachfolgenden Abschnitt werden die bisherigen Anwendungen der Erweiterungen des homogenen Markov-Prozesses dargestellt.

### **Anwendungsbeispiele des inhomogenen Markov-Prozesses**

Die Anwendung von inhomogenen Markov-Prozessen erfolgte im Rahmen von mehreren Studien in unterschiedlichen Fachdisziplinen. Zum einen wird durch eine Unterteilung der Datengrundlage in verhaltenshomogene Gruppen und einer anschließenden Erstellung von kohortenspezifischen Übergangsmatrizen versucht, den Aspekt der Mehrdimensionalität besser abbilden zu können [Kristensen 1996]. Zum anderen besteht die Möglichkeit anhand von alters- bzw. zeitabhängigen Übergangswahrscheinlichkeiten die zuvor kritisierte Annahme der Markov-Eigenschaft aufzuheben.

Vanclay [1994] äußert, dass Markov-Modelle nur exakt sind, wenn für jedes einzelne Objekt sämtliche (Begleit-)Daten vorliegen. Anderenfalls kann zunächst ein **Kohortenmodell** für verschiedene Teilgruppen erstellt und anschließend für jede dieser Teilgruppen ein eigenes (Teil-)Modell erstellt werden. Entsprechende Anwendungsbeispiele solcher Prognosemodelle sind sowohl in der Forstwirtschaft [Vanclay 1994] als auch in der Landwirtschaft [Kristensen 1996] zahlreich anzutreffen.

Im Bereich der Straßenerhaltung erfolgte durch Li, Xie und Haas [1996] eine Anwendung von inhomogenen Markov-Prozessen zur Prognose der Schadensentwicklung von Straßenbefestigungen auf der Netzebene, um die beschriebenen Nachteile des homogenen Markov-Prozesses zu beheben.

In der Studie von Hess, Fergen, Ochsenreither und Temme [2013] wurde ebenfalls ein auf vier Zustandsklassen beruhendes Prognosemodell durch die Verwendung von verhaltenshomogenen Klassen verfeinert. Dazu wurde bei Bundesautobahnen zwischen zwei und bei Bundesstraßen zwischen drei verhaltenshomogenen Klassen differenziert. Im Hinblick auf eine Berücksichtigung des klimatischen Einflusses auf die Zustandsentwicklung wurden jeweils drei Klassen für die Anzahl an Frostwechsel- und Sommertagen gebildet.

Im Rahmen der Entwicklung eines Markov-basiertes Prognosemodells für Bundesfernstraßen, welches mit ZEB-Daten validiert wurde, erfolgte ebenso eine Differenzierung der Datengrundlage (274 km) nach verhaltenshomogenen Teilgruppen. Hierbei zeigte sich jedoch erneut die Problematik einer zu geringen Datengrundlage, sodass sich die Untersuchungen auf diejenigen verhaltenshomogenen Gruppen beschränkten, zu denen die größte Datenbasis vorlag [Iwojlow 2014].

Eine Anwendung eines auf **altersabhängigen Übergangswahrscheinlichkeiten** basierenden Modells erfolgte bereits Ende der 1970er Jahre von Kouba [1977, 1989]. Zum Ende der 1980er Jahre verwendeten Butt, Shahin, Feighan und Carpenter [1987] eine Kombination aus homogenen und inhomogenen Markov-Ketten um die Zustandsentwicklung des merkmalsübergreifenden Pavement Condition Index (PCI) zu berechnen. Dazu gliederten sie die Lebensdauer einer Asphaltbefestigung in Sechsjahresintervalle. Für jedes dieser Zeitintervalle wurde eine eigene Übergangsmatrix mit Hilfe einer nichtlinearen Programmierung erstellt. Die mit dem Markov-Modell berechnete Zustandsentwicklung wurde mit den Ergebnissen aus klassischen Regressionsanalysen verglichen (vgl. Abbildung 38).

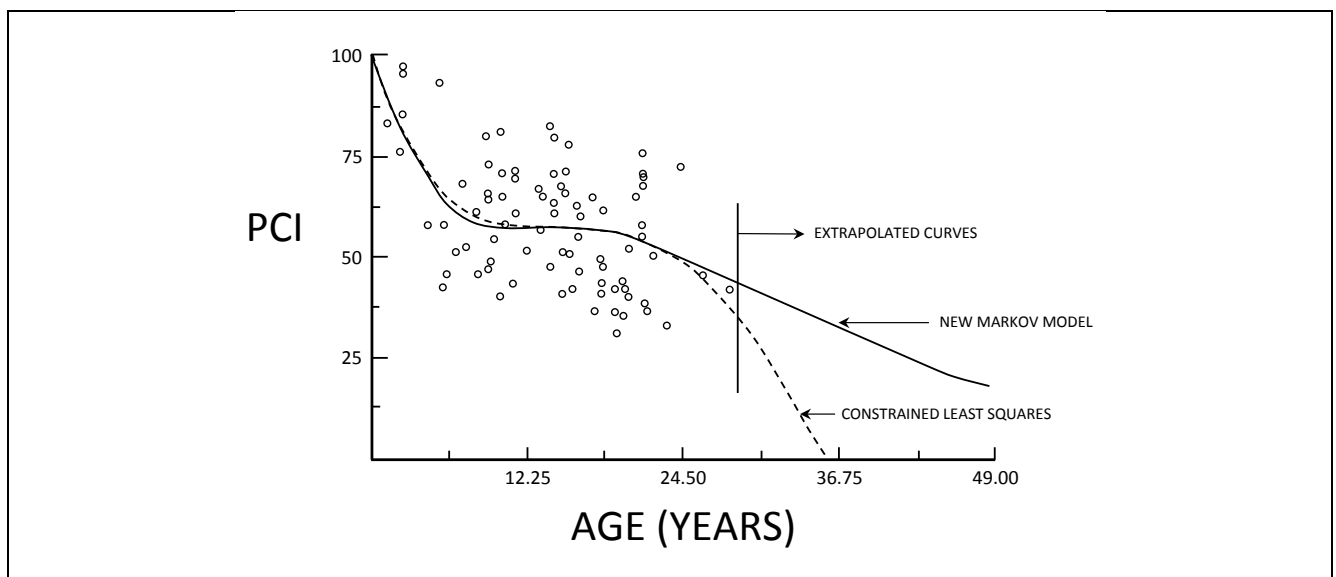


Abbildung 38: Vergleich der prognostizierten Zustandsverläufe mittels Regression und „neuem Markov-Modell“ [Butt et al. 1987]

Dieses Prognosemodell wurde in die Module eines PMS implementiert [Butt, Shahin, Feighan, Carpenter, Carnahan 1994]. Durch die Kombination von Markov-Prozessen und dynamischen Optimierungstools konnten die Verfahren zur Priorisierung von Erhaltungsmaßnahmen deutlich verbessert werden.

In der Studie von Li et al. [1996] wurden die Übergangsmatrizen in Abhängigkeit der Zeit mit Hilfe von Risikoanalysen und Monte-Carlo-Methoden simuliert. Der Vorteil dieser Vorgehensweise wurde

darin gesehen, dass weder Expertenbefragungen noch eine große Datengrundlage vorliegen mussten. Zusätzlich wurde innerhalb der Studie untersucht, inwieweit die Zustandsentwicklung von Straßen von den dimensionierungsrelevanten Einflussgrößen, wie z. B. der Zunahme der Verkehrsbelastung, der Beschaffenheit des Untergrundes und den Mischguteigenschaften, beeinflusst wird. Die ermittelte Prognosefunktion zur Abbildung des Zustandsindikators Pavement Condition State (PCS) in Abhängigkeit der zukünftigen Entwicklung der Verkehrsbelastung ist in Abbildung 39 dargestellt.

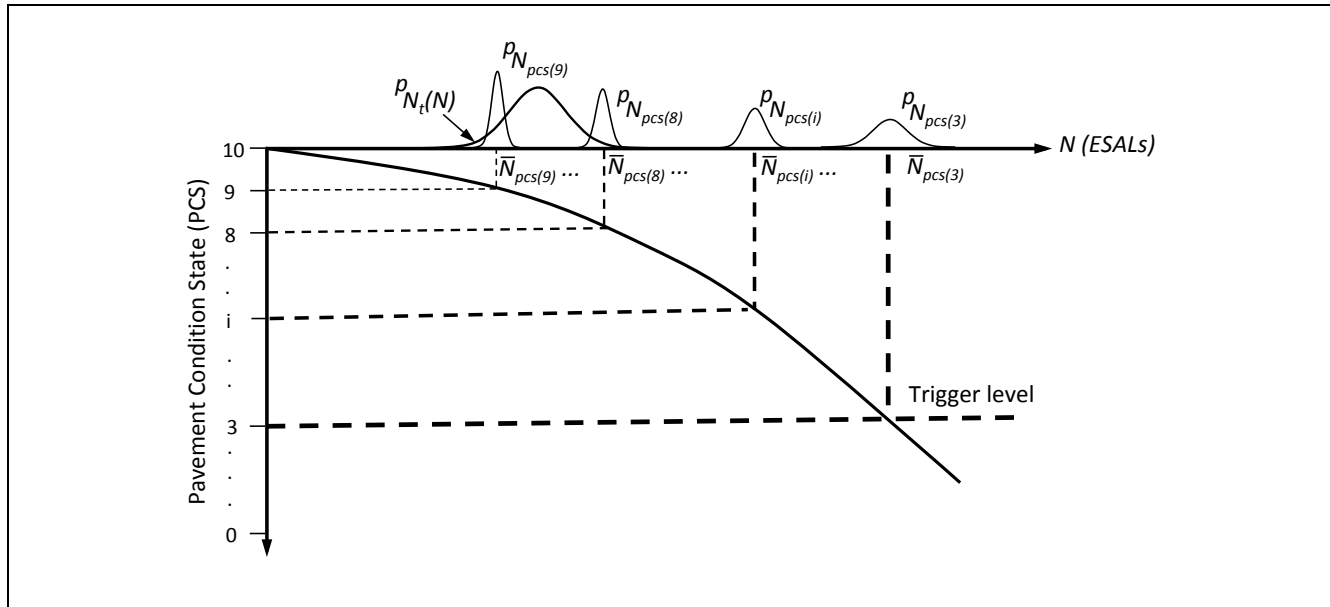


Abbildung 39: Prognostizierte Verkehrsbelastungen und daraus abgeschätzte Prognosefunktion des Straßenzustandes [Li et al. 1996]

Yang, Gunaratne, Lu und Dietrich [2005] sowie Yang [2012] entwickelten einen dynamischen Markov-Prozess, in dem die Übergangswahrscheinlichkeiten mit Hilfe von Logistischen Modellen berechnet wurden. Die Anwendung des Modells erfolgte auf Zustandsdaten des Zustandsmerkmals Risse von Straßen des Bundesstaates Florida in den USA. Mills, Attoh-Okine und McNeil [2012] entwickelten ebenfalls ein Prognosemodell für Querrisse. Dazu wurde eine hierarchische Markov-Ketten-Monte-Carlo-Simulation verwendet, mit der die Rissbildung von Asphaltstraßen in Delaware vorhergesagt wurde. Die Übergangswahrscheinlichkeiten innerhalb der Matrix wurden mit Hilfe von Poisson- und Weibull-Verteilungen beschrieben.

Eine Anwendung von inhomogenen Übergangswahrscheinlichkeiten auf ZEB-Daten erfolgte durch Blumenfeld [2016] am Beispiel von Bayerischen Staatsstraßen. Eine Analyse der liegezeitabhängigen Übergangsmatrizen zeigte, dass die darin enthaltenen Übergangswahrscheinlichkeiten deutlich variieren und somit die Plausibilität der Verwendung von inhomogenen Übergangsmatrizen bestätigen. In Abbildung 40 ist die Zustandsprognose eines fünf Jahre alten Straßenabschnittes exemplarisch dargestellt.

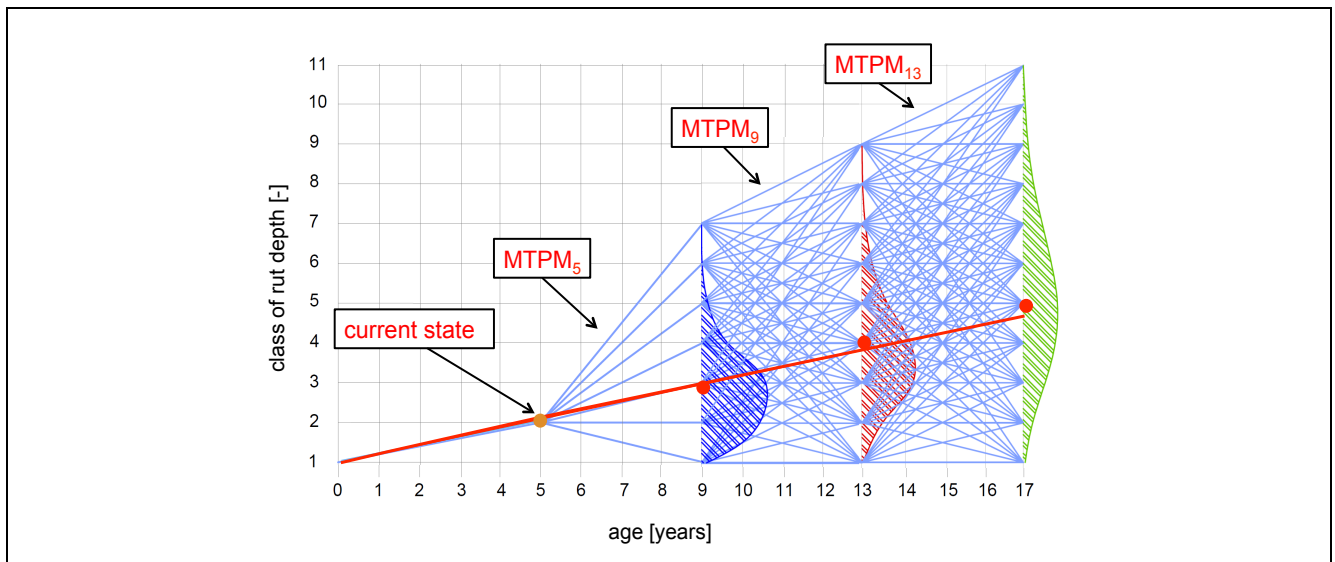


Abbildung 40: Prognose der Zustandsentwicklung der Spurrinnentiefe eines 5 Jahre alten Straßenabschnittes [Blumenfeld 2016]

Für die Vorhersage der Entstehung von Ausbrüchen in Fahrbahnoberflächen auf Brückenbauwerken wurde von Ninomiya, Mizutani und Kaito [2017] ebenfalls ein kombiniertes Verfahren entwickelt. Die Entstehung von Ausbrüchen wurde mit Hilfe von Poisson-Prozessen modelliert. Die Schadensentwicklung der Fahrbahnoberfläche erfolgte hingegen mittels eines klassischen Markov-Prozesses, wobei die Übergangswahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung der beobachteten Schadensraten und der unterschiedlichen Schadenszunahmen geschätzt wurden.

Zusammenfassend ermöglicht eine Unterteilung der Datengrundlage in verhaltenshomogene Gruppen eine Reduzierung der Streuung bei der Zustandsprognose. Die Ergebnisse der Studie von [Li et al. 1996] zeigten, dass die Sensitivität der Übergangswahrscheinlichkeiten auf die Faktoren Zunahme der Verkehrsbelastung, Verformung des Untergrundes, Dicke des Oberbaus signifikant ist. Des Weiteren werden altersabhängige Übergangswahrscheinlichkeiten oftmals als geeigneter gesehen, um eine realistische Beschreibung der Zustandsentwicklung zu ermöglichen [Madanat, Mishalani, Wan, Ibrahim 1995; Ravirala, Grivas 1995; Guigner, Madanat 1999]. Ein Vergleich von Ergebnissen eines dynamischen mit den Ergebnissen eines stationären Markov-Prozesses zeigte, dass der dynamische Ansatz bessere Prognoseergebnisse liefert [Yang et al. 2005].

Zu den Nachteilen von inhomogenen, mehrdimensionalen Übergangswahrscheinlichkeiten zählen Houben, Huirne, Dijkhuizen, Kristensen und Anders [1994], Kristensen [1996] sowie Micevski et al. [2002], dass für deren Ermittlung eine deutlich größere Anzahl an Parametern aus den Daten abgeleitet werden müssen. Dies ist jedoch meist durch eine nicht ausreichend große Datengrundlage und Rechenkapazität beschränkt [Hess et al. 2013].

Weninger-Vycudil et al. [2009] sehen eine Ermittlung von zeitabhängigen Übergangswahrscheinlichkeiten auf Basis von erfassten Zustandsdaten derzeit als nicht umsetzbar, da bei dünn besetzten Klassen die Übergangswahrscheinlichkeiten nicht zuverlässig ermittelt werden können. Durch die Nichtbesetzung von Klassen kommt es zu teilweise erheblichen Verzerrungen der Übergangswahrscheinlichkeiten. Die Ableitung und Verwendung abschnittsspezifischer Übergangsmatrizen ist theoretisch mittels Simulationstechniken denkbar, erfordert jedoch einen hohen Rechenaufwand.

## Anwendungsbeispiele des Semi-Markov-Prozesses

Weiterführende Anwendungen des **Semi-Markov-Prozesses** fanden insbesondere Anwendung in den Bereichen des Erhaltungsmanagements von Brückenbauwerken und von Transformatoren [Ng 1996; Black et al. 2005a, 2005b; Sobanjo 2011]. Ng und Moses [1998] sowie Thomas und Sobanjo [2016] verwendeten einen auf Semi-Markov-Ketten basierenden Ansatz zur Modellierung der Zustandsentwicklung von einzelnen Brückenbauteilen. Die in einer Untersuchung von Bortot et al. [2006] ermittelten Ergebnisse der Prognose wurden seitens der Verfasser als realistisch eingestuft (vgl. Abbildung 41). Jedoch hätten längere Zeitreihen an Daten zu einer deutlichen verbesserten Abbildung der Zustandsentwicklung beigetragen [Bortot et al. 2006].

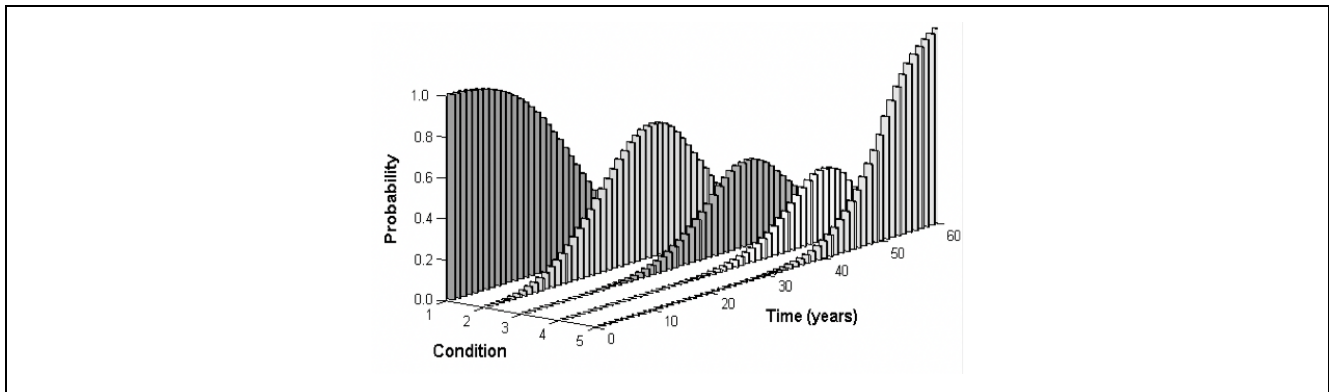


Abbildung 41: Veränderung der Zustandsverteilung eines Brückenelements in Betonbauweise [Bortot et al. 2006]

Die Anwendbarkeit von Semi-Markov-Prozessen auf die Zustandsentwicklung von Rissen in Asphaltbefestigungen wurde bereits mehrfach exemplarisch getestet [Yang et al. 2005; Yang et al. 2009]. Thomas und Sobanjo [2016] entwickelten ebenfalls ein auf Semi-Markov-Prozessen basiertes Prognosemodell, welches Verweilzeiten beinhaltet, die einer Weibull-Verteilung folgen. Mit diesem Ansatz konnte die Verweilzeit je Zustandsklasse in Abhängigkeit des Prognosezeitraums ermittelt werden, sodass für jeden Einjahreszeitschritt eine Übergangsmatrix erstellt wurde. Ein Vergleich der Ergebnisse des homogenen Markov-Prozesses und des Semi-Markov-Prozesses zeigte, dass in einigen Fällen der Semi-Markov-Prozess die tatsächliche Schadensentwicklung am Beispiel des Zustandsmerkmals Risse für Asphaltbefestigungen besser abbildet, wenn eine ausreichend große Datenbasis zur Auswertung vorliegt (vgl. Abbildung 42).

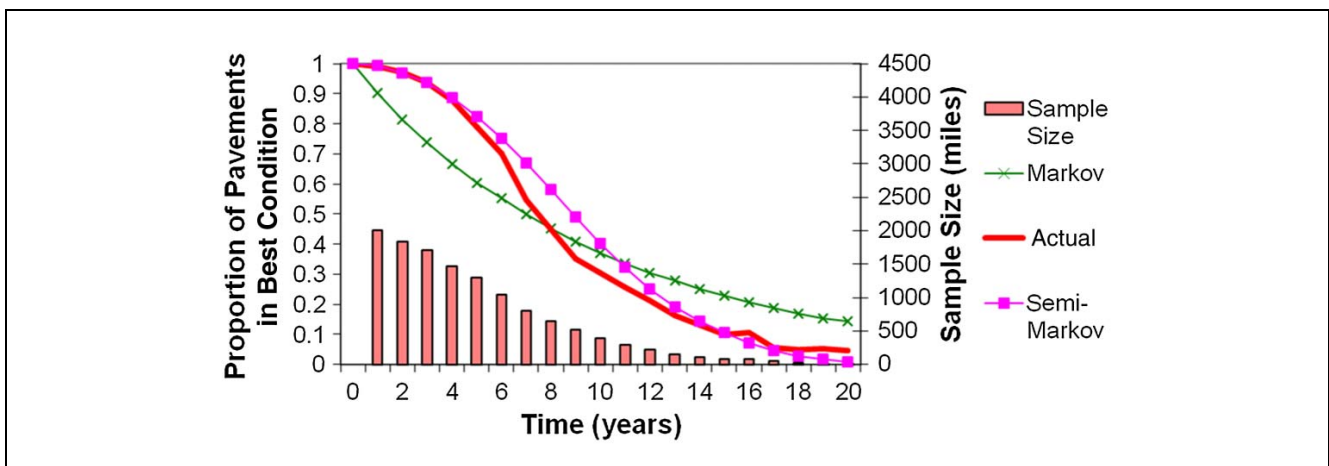


Abbildung 42: Vergleich von berechneten "Survivor-Curves" mit Markov-Prozess, Semi-Markov-Prozess und tatsächlicher Zustandsentwicklung [Thomas, Sobanjo 2016]

---

Thomas [2011] sieht in der Anwendung des Semi-Markov-Prozesses eine vielversprechende Möglichkeit, das Zustandsverhalten von Asphaltbefestigungen auf der Netzebene zu untersuchen, da bei diesen Ansätzen u. a. das Alter der Infrastruktur bei der Prognose mitberücksichtigt wird. Weiterhin können die natürlichen Schwankungen des Systems mit der beschriebenen Methode sehr gut abgebildet werden.

Die Ergebnisse der Studie von Thomas und Sobanjo [2016] wurden mit den Ergebnissen anderer Semi-Markov-Ansätze, dem homogenen Markov-Prozess sowie der mittleren deterministischen Zustandsprognose über einen Zeitraum von acht Jahren gegenübergestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die aus Semi-Markov-Prozessen ermittelten Prognosefunktionen die tatsächliche Schadensentwicklung sehr gut abbilden. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigten, dass Semi-Markov-Prozesse praktikabel und deutlich flexibler im Vergleich zu den klassischen homogenen Markov-Prozessen und zur Prognose des Zustandes von Infrastrukturanlagen geeignet sind [Thomas, Sobanjo 2016].

### **3.7.2 Anwendungen der Survival-Analyse**

Die Anwendung der Survival-Analyse zur Analyse und Prognose von Straßenzustandsdaten ist in der Literatur weniger häufig anzutreffen. Für deren Anwendung muss zunächst der Zeitpunkt des „Ausfalls“ einer Fahrbahnoberfläche definiert werden. Dies kann bspw. anhand des erstmaligen Auftretens von Rissen in einer Fahrbahnoberfläche [Wang, Mahoub, Hancher 2005], des Erreichen eines zu definierenden merkmalspezifischen Grenzwertes oder der Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen [Prozzi und Madanat 2000] erfolgen.

Die erste dokumentierte Anwendung der Survival-Analyse auf Asphaltstraßen in den USA erfolgte von Farrell und Winfrey [1941]. Diese ermittelten anhand von Langezeitbeobachtungen an Straßenabschnitten zwischen 1903 und 1937 in insgesamt 46 Bundesstaaten die Liegezeiten bis zur Durchführung einer Erhaltungsmaßnahme. Diese tabellarische Zusammenstellung an Informationen wurden im Laufe der Zeit aktualisiert und bis in die 1960er Jahre genutzt [Gronberg, Blosser 1956; Winfrey, Howell 1968]. Diese rein empirischen Modelle berücksichtigten jedoch weder die zwischenzeitliche Weiterentwicklung von neuen Bauweisen und -materialien noch die deutliche Verkehrszunahme [FHWA 2013].

Die Methodik fand weiterhin im Rahmen des Highway Development and Management Models (HDM) Anwendung, um netzweit die Ausfallwahrscheinlichkeit von Straßenabschnitten abzuschätzen. Um die Zustandsprognose zu verfeinern, werden oftmals für verschiedene Teilnetze eigene Ausfallverteilungen ermittelt und diese im Laufe der Zeit kalibriert. Die Unterteilung in Teilnetze ist jedoch stets vom Umfang der vorhandenen Datengrundlage abhängig.

In zahlreichen Anwendungsbeispielen wird die Survival-Analyse zur Abschätzung der Rissbildung einer Fahrbahnoberfläche genutzt [Paterson 1987; Van Dam, Chester, Peshkin 1997; Shin, Madanat 2003; Loizos, Karlaftis 2005; Christofa, Madanat 2010; Reger, Christofa, Guler, Madanat 2013].

Im deutschsprachigen Raum untersuchten Klinghammer et al. [1997] erstmals die Anwendung der Survival-Analyse auf Straßenzustandsdaten. Dazu wurden Zustandswerte der Oberflächenmerkmale von Straßenabschnitten mit einer Gesamtlänge von ca. 4.800 km ausgewertet und mit Hilfe der Survival-Analyse untersucht, zu welchem Zeitpunkt ein „Ausfall“ der Straßenabschnitte zu beobachten war. Als Grenzwert für einen „Ausfall“ wurde der Warnwert (vgl. Kapitel 2.6.2.5) verwendet (vgl. Abbildung 43).

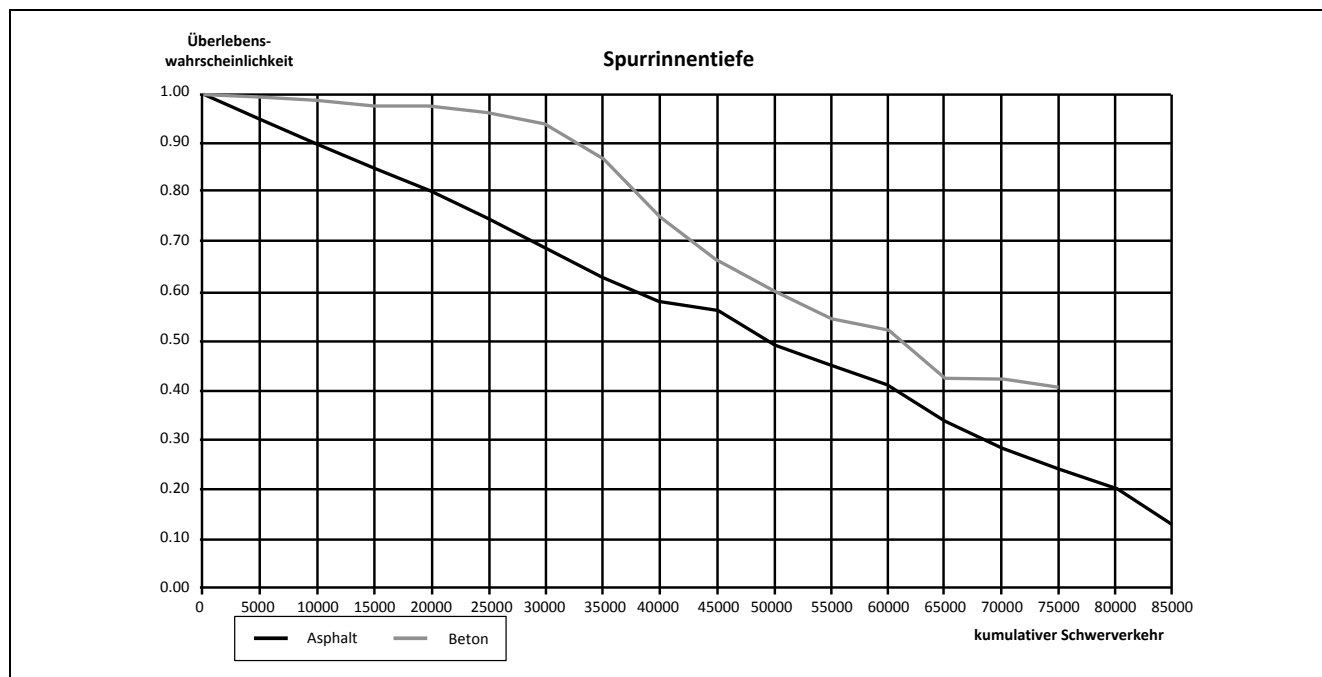


Abbildung 43: Vergleich der Überlebenskurven der zementgebundenen mit bituminösen Strecken [Klinghammer et al. 1997]

Klinghammer et al. [1997] bezeichnen die Survival-Analyse als einfach anwendbare Methodik, die besonders gut für die Anwendung im Erhaltungsmanagement von Straßen geeignet sei, da die empirischen Ausfallverteilungen durch theoretische Verteilungen ersetzt und gut approximiert werden können. Die Methode erlaubt den Vergleich zwischen verschiedenen Bauweisen und Belastungsklassen und ermöglicht die Modellierung der Alterung von Streckenabschnitten, während andere statistische Methoden, wie z. B. Varianzanalysen und multiple Regressionen bei diesen Daten nicht anwendbar sind. Während sowohl deterministische als auch andere probabilistische Methoden die Problematik der Datenzensur beinhalten, erlaubt die Survival-Analyse den expliziten Umgang mit solchen Daten. Aguiar-Moya, Banerjee und Prozzi [2010] nennen als weiteren Vorteil der Methode im Vergleich zum Markov-Prozess, dass keine Diskretisierung von Zuständen erforderlich ist.

Die grundsätzliche Anwendbarkeit der Methode konnte im Rahmen mehrerer Untersuchungen aufgezeigt werden. Die in den Überlebenskurven zum Teil enthaltene Unstetigkeit wies darauf hin, dass insbesondere die Dokumentation von Erhaltungsmaßnahmen und Bauweisen deutlich zu verbessern ist [Klinghammer et al. 1997]. Ähnlich wie bei den Markov-Prozessen ist eine Verfeinerung der Modelle durch Bildung von verhaltenshomogenen Gruppen möglich, die jedoch zumeist durch die Größe der vorhandenen Datengrundlage limitiert ist. Ein weiterer Nachteil der Methode wird von der National Academies of Science, Engineering, and Medicine [2011] darin gesehen, dass die zwischenzeitliche Weiterentwicklung von neuen Bauweisen und Materialien nicht abgebildet werden kann. Dies kann jedoch mit einer Kombination aus einer Survival-Analyse mit mechanistisch-empirischen Methoden behoben werden. Weiterhin wird von Klinghammer et al. [1997] als nachteilig gesehen, dass nur eine zweistufige Bewertung der Messergebnisse in „Überleben“ oder „Ausfall“ möglich ist.

Eine zusätzliche Herausforderung besteht darin, dass ein „Ausfall“ eines Straßenabschnittes oftmals nicht allein auf ein Oberflächenmerkmal zurückzuführen ist [Wermuth 2012], sondern zwischen einzelnen Zustandsindikatoren erhebliche Korrelationen vorhanden sind. Um diese Abhängigkeiten bei

der Abschätzung eines „Ausfalls“ quantifizieren zu können, entwickelten Hoffmann [2006], sowie Hoffmann und Donev [2014] die Methodik der Survival-Analyse im Rahmen von Simulationen weiter.

Dieser methodische Ansatz basiert auf dem Integral von skalierten empirischen oder mechanistischen Verhaltensfunktionen mit ihrer jeweiligen Fehlerverteilung anhand derer die Restnutzungsdauern abgeschätzt werden. Als Datengrundlage verwendeten die Autoren im vorliegenden Fall Zustandserfassungen von österreichischen und US-amerikanischen Straßen (Long-Term-Pavement-Performance-Datenbank) für das Zustandsmerkmal Querrisse.

Neben der probabilistischen Zustandsprognose von Asphaltbefestigungen anhand von empirischen Zustandsdaten wurden in den vergangenen Jahren zunehmend wahrscheinkeitsbasierte Verfahren für die rechnerische Dimensionierung und somit die Abschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeiten von Fahrbahnbefestigungen in Asphaltbauweise weiterentwickelt. Wellner, Kayser, Kuhlisch und Kiehne [2013] entwickelten hierzu den in den RDO Asphalt 09 enthaltenen semi-probabilistischen Ansatz in eine rein probabilistische Methode. Dazu wurden die Eingangsgrößen und Materialkennwerte mit Hilfe von diskreten Dichte- und Verteilungsfunktionen beschrieben. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist die Ausfallwahrscheinlichkeit nach einer festgelegten Nutzungsdauer einer Asphaltbefestigung, die als Flächenanteil der gesamten Konstruktion definiert ist. Die Abbildung 44 zeigt die bei der Berechnung von Ausfallwahrscheinlichkeiten verwendeten Module.

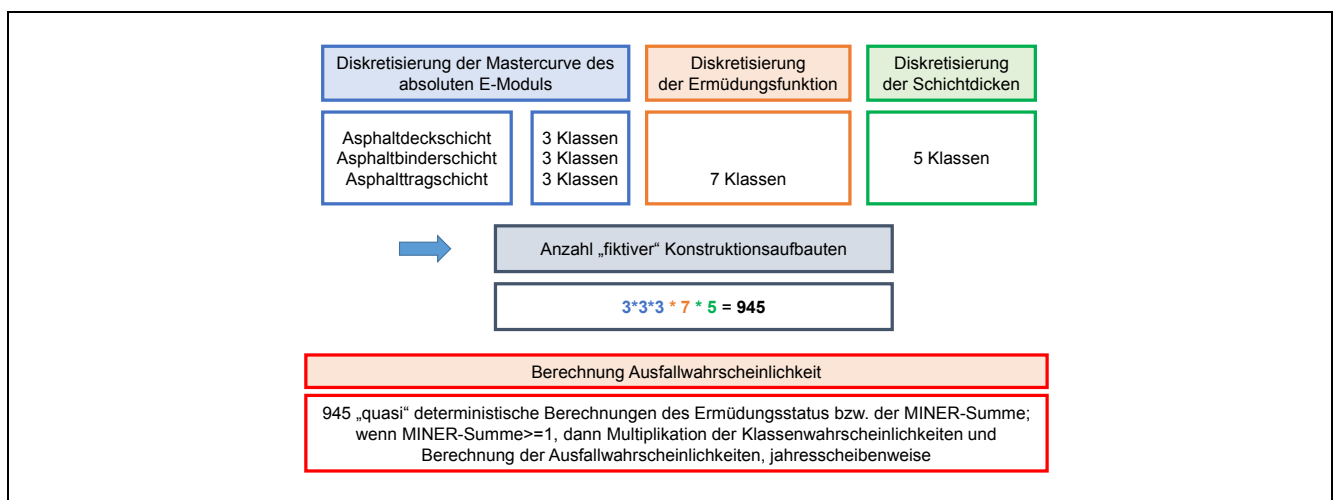


Abbildung 44: Verwendete Module zur rechnerischen Ermittlung von Ausfallwahrscheinlichkeiten [Oeser et al. 2017]

Aufgrund der großen Streuungen in den Eingangsgrößen hat man in den Regelwerken der FGSV damit begonnen, zu den bestehenden deterministischen Berechnungsverfahren zum Teil auch probabilistische Verfahren zu ergänzen. Die RSO Asphalt beinhalten ein solches probabilistisches Verfahren, um Ausfallzeitpunkte und -verteilungen von Asphalttragschichten auf Objektebene zu bestimmen. Dazu werden die Streuungen der Eingangswerte und Vergleichskenngrößen anhand von diskreten Normalverteilungen abgebildet. Die rechnerische Ermittlung von Spannungen und Dehnungen erfolgt analog zu dem deterministischen Verfahren. Anstelle der Berechnung eines einzelnen Wertes werden jedoch die Berechnungen für jede Kombinationsmöglichkeit der Eingangswerte Aufbaudicke und Steifigkeit vollzogen. Die an den vorgegebenen Nachweisstellen berechneten Beanspruchungen werden anschließend den ertragbaren Achsübergängen gegenübergestellt.



---

### 3.7.3 Anwendungen der Bayes'schen Statistik

Der Ansatz der Bayes'schen Statistik zur Entwicklung von Prognosemodellen kommt seit einigen Jahren weltweit ebenfalls zum Einsatz. Insbesondere wenn (zu) wenige Zustandsdaten für eine Ermittlung von Übergangswahrscheinlichkeiten vorliegen oder die Datenqualität nicht ausreichend ist, bietet es sich an, Expertensysteme mit empirischen Zustandsdaten zu kombinieren [Tabatabaee, Ziyadi 2013]. So verwendeten Smith, Finn, Kulkarni [1979] sowie Hajek und Bradbury [1996] die Bayes'sche Statistik, um die Oberflächenmerkmale einer Straße in Abhängigkeit von verschiedenen Bauweisen zu prognostizieren. In Harper und Majidzadeh [1991] wurde Expertenwissen in diese Modelle integriert und ein entsprechender Ansatz innerhalb des PMS in Portugal verwendet. Die Anwendung der Methode lieferte gute Ergebnisse [Ferreira, Pais Antunes, Picado Santos 1999].

Li [2005] entwickelte ein probabilistisches Prognosemodell, das kontinuierlich mit neuen Messergebnissen der Zustandserfassung aktualisiert wird. Informationen zu Materialeigenschaften, klimatischen Randbedingungen sowie der Verkehrsbelastung wurden innerhalb des Modells berücksichtigt. Es zeigte sich, dass nicht alle Parameter innerhalb des Modells einer Normalverteilung folgen. Daher zählt Li [2005] zu den Vorteilen der Methode, dass der Bayes'sche Ansatz auch nichtnormalverteilte Einflussgrößen abbilden kann. In dieser Studie wurde ein Gibbs-Sampling-Algorithmus in Kombination mit einer Monte-Carlo-Markov-Chain-Simulation verwendet, um die Parameter der Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu ermitteln. Es zeigte sich, dass die angewendeten Algorithmen effektiv und robust sind und die Streuungen der Zustandsentwicklungen gut wiedergegeben werden.

Die Bayes'sche Methode wird als effektiver und flexibler Ansatz angesehen, um die Zustandsprognose zu verbessern. Ein Vergleich zwischen den Prognoseergebnissen mit aktualisierten und nicht aktualisierten Übergangswahrscheinlichkeiten zeigt, dass eine kontinuierliche Aktualisierung der Übergangswahrscheinlichkeiten anhand von Messergebnissen zu verbesserten Ergebnissen führt. Es wurde festgestellt, dass sowohl das vorgegebene Systemverhalten als auch die erfassten Zustandsdaten eine ausreichend hohe Präzision aufweisen sollten, um eine abgesicherte Prognose durchführen zu können. Hong und Prozzi [2005] verwendeten Zustandsdaten eines Streckenabschnittes in Minnesota, um die vorgeschlagene Methodik (Updated TPMs) exemplarisch zu testen und mit anderen Methoden (Homogenous TPM und Initial TPM) zu vergleichen (vgl. Abbildung 45).

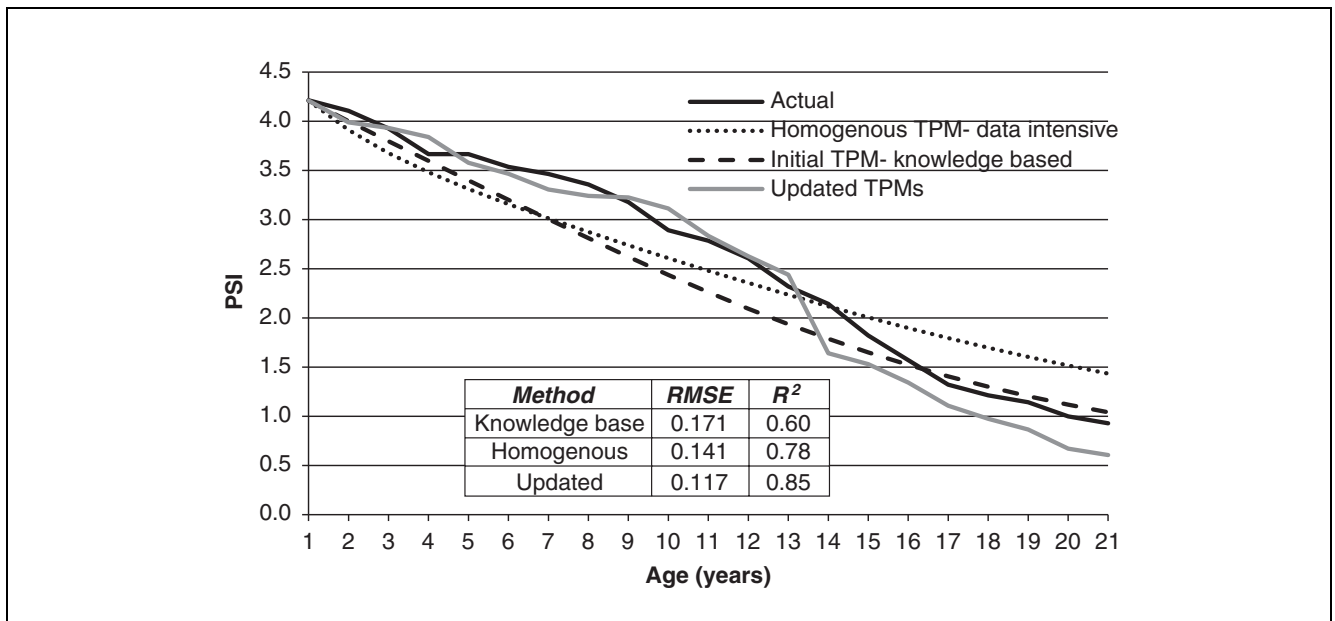


Abbildung 45: Gegenüberstellung von prognostizierten Zustandsentwicklungen mit verschiedenen Methoden [Hong, Prozzi 2005]

Prozzi, Serigos, Kim und Xu [2017] sehen die Verwendung der Bayes'schen Statistik als deutlichen Vorteil gegenüber anderen probabilistischen Methoden, wenn große Unsicherheiten in der Schadensausprägung und nur eine geringe Anzahl an Beobachtungen je Objekt zur Auswertung vorliegen. Die Methodik wurde ebenfalls exemplarisch von Park, Smith, Freeman und Spiegelmann [2008] auf Zustandsdaten von einzelnen Teststrecken in Texas angewendet, deren Ergebnisse seitens der Autoren als plausibel und statistisch abgesichert angesehen werden.

### 3.8 Vergleichende Bewertung der probabilistischen Methoden

Die Sichtung der Literatur zu probabilistischen Analyse- und Prognoseverfahren zeigt deren hohes Potential zur Modellierung wahrscheinlichkeitsbasierter Schadensverläufe auf. Durch die Möglichkeit, die natürlichen Streuungen der Eingangsgrößen innerhalb des Erhaltungsmanagements zu berücksichtigen, sind sie als deutliche Verbesserung bzw. Erweiterung im Vergleich zu den deterministischen Ansätzen zu sehen.

Die Erprobung und praktische Anwendbarkeit der Ansätze ist stark von der zugrundeliegenden Datenqualität sowie dem Aufwand der Datenaufbereitung abhängig. Des Weiteren unterscheiden sich die Methoden in den Ansätzen zur Beschreibung von Zuständen und Zustandsverläufen sowie in der Möglichkeit zur Berücksichtigung von Messunsicherheiten bei der Zustandserfassung. Eine zunehmend größere Datenbasis sowie Fortschritte in der Leistungsfähigkeit von Rechensystemen ermöglichen mittlerweile die Modellierung von komplexen wahrscheinlichkeitsbasierten Modellen. Im Nachfolgenden erfolgt eine vergleichende Bewertung der betrachteten Methoden anhand der Kriterien

1. Beschreibung des Zustandes,
2. Aufwand der Datenaufbereitung,
3. Beschreibung des Zustandsverlaufs,
4. Berücksichtigung von Messunsicherheit,
5. Komplexität der Modellierung.

---

## Beschreibung des Zustandes

Der Markov-Prozess wurde ursprünglich für diskret beschriebene Objekte entwickelt, sodass für dessen Anwendung eine „künstliche“ Einteilung der Variablen in Klassen notwendig ist, die zu Diskretisierungsfehlern führt. Die Survival-Analyse differenziert hingegen nur zwischen „Ausfall“ und „Nicht-Ausfall“ eines Streckenabschnittes. Dies führt ebenfalls zu einer Informationsreduktion. Bayes-Filter arbeiten hingegen, je nach Variation des Filters, sowohl mit stetigen (normalverteilten) als auch mit diskret beschriebenen (ggf. nicht normalverteilten) Verteilungsfunktionen.

## Aufwand der Datenaufbereitung

Für die Anwendung des Markov-Prozesses auf Straßenzustandsdaten werden nur die Messergebnisse aus zwei Zustandserfassungen benötigt. Es wird jeweils die Differenz der beiden auswerteabschnittsbezogenen Messergebnisse gebildet. Eine Dokumentation von Erhaltungsmaßnahmen ist nicht notwendig, da sämtliche, gemessenen Zustandsverbesserungen bei der Ableitung der Häufigkeiten von Zustandsänderungen oftmals aus den Datensätzen entfernt werden. Diese Vorgehensweise weist zwar den geringsten Aufwand bei der Datenaufbereitung auf, führt jedoch zu einer systematischen Überschätzung der Schädigungsraten (vgl. Kapitel 5.5).

Für die Anwendung der Survival-Analyse sowie der Bayes-Filter wird hingegen der Zeitpunkt zur jeweils zuletzt durchgeführten Erhaltungsmaßnahme bzw. die daraus abgeleitete Liegezeit benötigt. Hierfür sind in einem zusätzlichen Arbeitsschritt im Rahmen der Datenaufbereitung die Zustands- und Aufbaudaten miteinander zu verschneiden und zu überprüfen. Die Filterung der Datensätze nach Abschnitten mit zwischenzeitlich durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen gestaltet sich immer noch als sehr arbeitsintensiv, ist jedoch für die Entwicklung eines Prognosemodells unabdingbar.

## Beschreibung des Zustandsverlaufs

Die am häufigsten angewendete Variante des Markov-Prozesses beinhaltet oftmals konstante Übergangswahrscheinlichkeiten, woraus im Rahmen der Zustandsprognose ein linearer, zumeist nicht realistischer Zustandsverlauf resultiert und die Lebensdauer einer Straße überschätzt wird. Eine Modellierung mit zeitabhängigen Übergangsmatrizen ermöglicht zwar die Abbildung von nicht-linearen Zustandsverläufen, erhöht jedoch deutlich die Komplexität des Ansatzes. Des Weiteren knüpft die Zustandsprognose allein an das Messergebnis der letzten Zustandserfassung an, sodass keine Verknüpfung zum bisherigen Zustandsverlauf gegeben ist (sog. „Gedächtnislosigkeit“).

Die Survival-Analyse berücksichtigt ebenfalls nur das Messergebnis aus der letzten Zustandserfassung. Ein Zustandsverlauf ist mit dieser Methode nicht direkt abbildbar, da vorrangig Ausfallwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Liegezeit oder der Anzahl an Achsübergängen modelliert werden. Vorherige Messergebnisse finden über die Liegezeit indirekt Berücksichtigung bei der Abschätzung der Lebensdauer.

Bayes-Filter verwenden für eine Abschätzung des Zustandsverlaufs die Messergebnisse aller vorliegenden Erfassungen eines Auswerteabschnitts. Durch Vorgabe eines a priori festgelegten Systemverhaltens ist die Abbildung von beliebigen Zustandsverläufen unter Berücksichtigung des mechanischen Werkstoffverhaltens möglich, sodass abschnittsindividuelle Verhaltenskurven modelliert werden können.

---

## **Berücksichtigung von Messunsicherheit**

Die Anwendung des Markov-Prozesses erfordert eine Diskretisierung des Zustandsraums. Hierbei erfolgt die Klassenzuteilung auf Basis des Messwertes. Je nach Messpräzision können jedoch erhebliche Fehler bei der Klassenzuteilung erfolgen (vgl. Kapitel 5.5). Ein systematischer Ausschluss von gemessenen Zustandsverbesserungen führt zu einer statistischen Fehlbeurteilung der Ergebnisse.

Bei der Survival-Analyse ist eine Berücksichtigung von Messunsicherheit aufgrund der bivariaten Unterteilung von Zuständen anhand eines festgelegten Grenzwertes in „Ausfall“ und „kein Ausfall“ ebenfalls nicht möglich.

Im Vergleich zum Markov-Prozess sowie zur Survival-Analyse besteht einer der wesentlichen Vorteile von Bayes-Filtern darin, dass merkmalspezifische, messbedingte Unsicherheiten bei der Zustandserfassung innerhalb des Modells abgebildet werden. Die Informationen zur Messpräzision zum Zeitpunkt einzelner Erfassungskampagnen werden bei der Modellierung berücksichtigt.

## **Komplexität der Modellierung**

Die Modellierung des Markov-Prozesses ist wenig komplex. Anhand der Differenz der Klassen zweier Erfassungskampagnen werden die absoluten und relativen Übergangshäufigkeiten ermittelt. Die Zustandsprognose erfolgt mit Hilfe einer Zustandsverteilung zum aktuellen Zeitpunkt und der Multiplikation mit einer Übergangsmatrix. Das Grundmodell kann bei Bedarf anhand von weiteren externen Einflussgrößen erweitert werden. Dazu wird je Teilmenge eine eigene Übergangsmatrix erstellt. Die Anwendung von zeitinhomogenen Übergangsmatrizen erhöht die Komplexität des Markov-Prozesses deutlich und führt oftmals dazu, dass im Rahmen einer späteren Anwendung innerhalb eines PMS keine Optimierung mehr stattfinden kann.

Für die Anwendung der Survival-Analyse müssen Zustandsdaten sowie Informationen zum Zeitpunkt der letzten Erhaltungsmaßnahme vorliegen. Weitere Informationen zum qualitativen Schadensverlauf sind für die Modellierung nicht zwangsläufig notwendig. Das Modell kann ebenfalls anhand von weiteren externen Einflussgrößen erweitert werden.

Bayes-Filter beruhen auf einer konsequenten Trennung zwischen einem Mess- und einem Prädiktionsmodell, die jeweils zu parametrisieren sind. Das Messmodell benötigt Informationen zur Messpräzision der verschiedenen Zustandsmerkmale. Das Prädiktionsmodell benötigt Informationen zum mechanistischen Schadensverlauf je Zustandsmerkmal in Form einer Prozessfunktion. Die Ermittlung und Kalibrierung der Prozessfunktion stellt das Kernelement eines Bayes-Filters und zugleich eine besondere Herausforderung dar. Der methodische Ansatz kann ebenso anhand von weiteren externen Einflussgrößen beliebig verfeinert werden.

In Tabelle 6 sind die zuvor beschriebenen Vor- und Nachteile der probabilistischen Analyse- und Prognosemethoden zusammengefasst.

Tabelle 6: Vergleichende Bewertung probabilistischer Analyse- und Prognosemethoden

Bewertungskriterium		Markov-Prozess	Survival-Analyse	Bayes'sche Statistik
1	Beschreibung des Zustandes	0	–	+
2	Aufwand der Datenaufbereitung	+	0	0
3	Beschreibung des Zustandsverlaufs	–	0	+
4	Berücksichtigung von Messunsicherheit	–	–	+
5	Komplexität der Modellierung	+	+	–
<b>Gesamtbewertung</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>+</b>

### 3.9 Strukturgleichungsmodellierung

Das Aufdecken von theorie- und evidenzbasierten Zusammenhängen innerhalb eines komplexen Systems kann mit Hilfe von Bayes'schen Netzen nur bedingt erfolgen [Pearl 1998]. Bayes'sche Netze können nur begrenzt zwischen zufälligen und scheinbaren Abhängigkeiten differenzieren. Daher empfehlen Gupta und Kim [2007] Bayes'sche Netze mit der Methodik der Strukturgleichungsmodellierung (SEM) zu verknüpfen. Sowohl Bayes'sche Netze als auch SEM sind grafische Modelle zur Abbildung von Ursache–Wirkungs-Zusammenhängen [Yoo, Oh 2013], die ineinander überführt werden können [Drudzel, Simon 1993; Anderson, Vastag 2004].

#### 3.9.1 Mathematische Grundlagen

Strukturgleichungsanalysen werden zur Analyse von komplexen Ursache–Wirkungs-Zusammenhängen zwischen manifesten und/oder latenten Variable verwendet. Sie sind das Standardinstrument zur empirischen Überprüfung von Hypothesensystemen in den Sozialwissenschaften [Weiber, Mühlhaus 2014] und können sehr flexibel auch auf andere Fachdisziplinen übertragen werden. Das Grundprinzip eines Strukturgleichungsmodells (SEM) basiert auf der Kombination von einem oder mehreren Messmodellen und einem Strukturmodell (vgl. Abbildung 46).

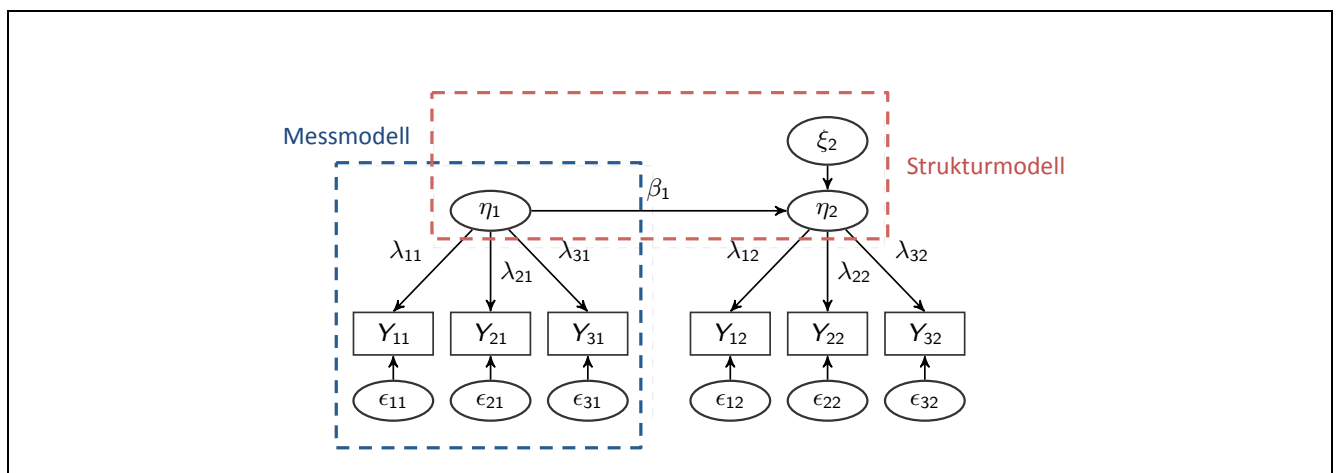


Abbildung 46: Grundstruktur eines Strukturgleichungsmodells [in Anlehnung an Steinmetz 2015]

Das Messmodell definiert die Beziehungen zwischen einer latenten Variable und deren manifesten Indikatoren. Die zugehörige Messgleichung lässt sich beschreiben als:

Formel 25: Messgleichung einer manifesten Variable

$$Y_{ij} = \alpha_{ij} + \lambda_{ji}\eta_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

mit:	$Y_{ij}$	manifeste Variable eines Indikators
	$\eta_{ij}$	latente Variable
	$\alpha_{ij}$	indikatorspezifische Konstante (Intercept)
	$\lambda_{ij}$	Faktorladung
	$\varepsilon_{ij}$	Messfehler der manifesten Variablen
	$i$	Anzahl an manifesten Variablen je Konstrukt
	$j$	Anzahl an latenten Variablen

Für die Abbildung einer Beziehung zwischen latenten Variablen wird weiterhin ein Strukturmodell gebildet, welches sich wie folgt beschreiben lässt:

Formel 26: Strukturgleichung zwischen zwei latenten Variable

$$\eta_{ij} = \mu_{ij} + \beta_i\eta_i + \xi_j$$

mit:	$\eta_{ij}$	latente Variable
	$\mu_{ij}$	indikatorspezifische Konstante (Intercept)
	$\beta_i$	direkter Effekt zwischen zwei latenten Variablen
	$\xi_j$	State-Residualvarianz der latenten Variable j

Ein Vorteil der Strukturanalysemethodik ist, dass bei der Schätzung von Einfluss- und Wechselwirkungen zwischen latenten Variablen fehlerbereinigte Schätzwerte berechnet werden können [Urban, Mayerl 2014; Weiber, Mühlhaus 2014]. Dies geschieht durch eine Zerlegung der Varianz jedes Items in drei Komponenten:

- Anteil „valider Varianz“, der durch die Beziehung zwischen manifestem Item und latentem Theoriekonstrukt geprägt wird
- Anteil „systematischer Fehlervarianz“, der zum Teil durch Fehlerkorrelation entsteht und welcher schwer zu messen ist
- Anteil „zufälliger Fehlervarianz“, der durch unsystematische, rein zufällig verteilte Messwertverzerrungen entsteht

Die systematische und die zufällige Fehlervarianz werden geschätzt und bei der Berechnung der Stärke von Wechselwirkungen zwischen den Faktorvariablen berücksichtigt [Urban, Mayerl 2014].

### 3.9.2 Beobachtbarkeit von Variablen

In Abgrenzung zur klassischen Regressionsanalyse, welche nur empirisch direkt messbare Variablen berücksichtigt, können mit Strukturgleichungsanalysen sowohl manifeste als auch latente, nicht direkt messbare Variablen analysiert werden. Hierbei können die Variablen zudem gleichzeitig sowohl abhängige als auch unabhängige Variablen darstellen. Die Möglichkeit zur Abbildung dieser Wechselbeziehungen innerhalb eines einzelnen Modells stellt eines der wesentlichen Vorteile dieser Methode dar. Während Regressionsanalysen keine Wechselbeziehungen (unilateral) zwischen den direkt beobachteten Variablen abbilden können, ist dies mit der Methodik der Strukturgleichungsanalyse möglich [Weiber, Mülhhaus 2014]. In der Abbildung 47 ist die Abgrenzung von Strukturgleichungsanalysen zur Regressionsanalyse sowie die Differenzierung verschiedener Varianten von SEM in Abhängigkeit der Beobachtbarkeit und vorhandenen Wechselbeziehungen von Variablen dargestellt.

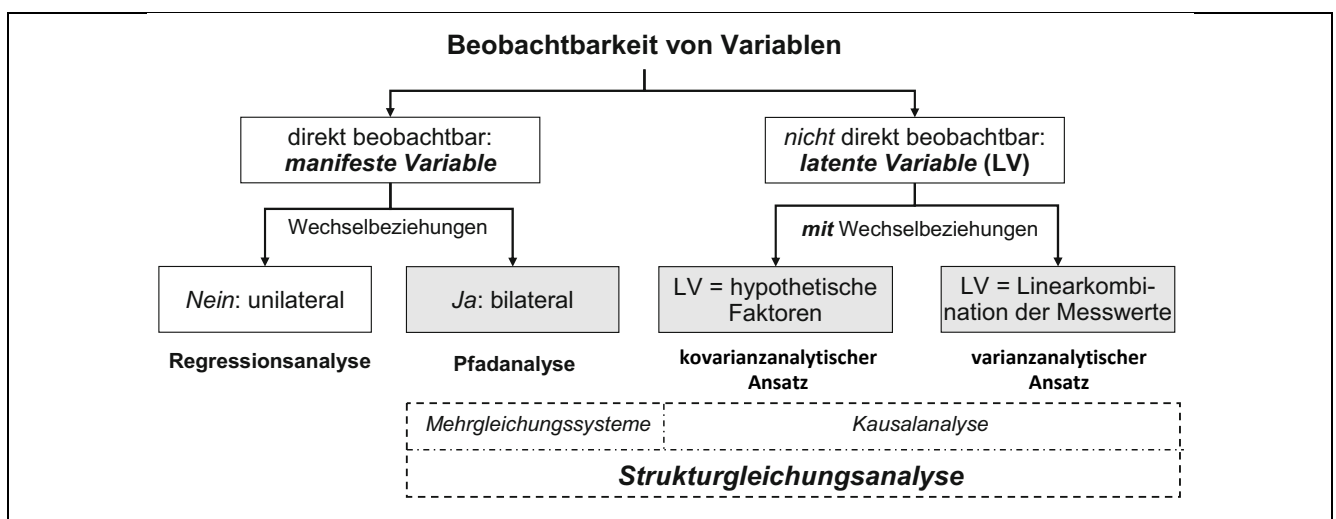


Abbildung 47: Methoden der Strukturgleichungsanalyse [Weiber, Mülhhaus 2014]

SEM können sowohl zur Analyse von Querschnittsdaten als auch von Längsschnittdaten verwendet werden. Längsschnittliche Analyseverfahren haben in der Regel das Ziel, Veränderungen von Objekten über einen definierten Zeitraum zu beschreiben und zu erklären sowie ggf. den weiteren Zustandsverlauf eines Merkmals zu prognostizieren [Backhaus, Erichson, Plinke, Weiber 2016]. Die wichtigsten Strukturgleichungsverfahren für längsschnittliche Datensätze werden im Folgenden vorgestellt.

### 3.9.3 Längsschnittliche Strukturgleichungsverfahren

Lineare SEM beinhalten eine Reihe an Variationen von Längsschnittstrukturgleichungsmodellen, welche sich grob in zwei Modellgruppen untergliedern lassen. Zum einen existieren Modelle zur Analyse von Variabilität (z. B. Latent-State- und Latent-State-Trait-Modelle), mit denen „*situationsspezifische Schwankungen von Messwerten um einen zeitstabilen Eigenschaftswert*“ [Geiser 2010, S. 93] analysiert werden können. Zum anderen liegen Modelle vor, die tatsächliche Veränderungen über einen längeren Zeitraum beschreiben sollen (z. B. manifeste und latente autoregressive Modelle, Latent-Change-Modelle und Latente Wachstumskurvenmodelle). Letztere Modellgruppe stellt insbesondere für die Analyse von Zeitreihen ein flexibles Werkzeug dar, d. h., wenn mehr als zwei Messzeitpunkte eines Merkmals vorliegen. Weiterhin verfügen latente Wachstumskurvenmodelle gegenüber den klassischen Analyseverfahren von Längsschnittdaten, wie bspw. der Varianzanalyse mit Messwiederholung, über



den wesentlichen Vorteil, dass die erwartete Kovarianzstruktur der beobachteten Variablen auf Basis eines theoretisch abgeleiteten Veränderungsmodells entwickelt wird [Schmiedek, Wolff 2010]. Daher werden im Folgenden die Grundlagen von latenten Wachstumskurvenmodellen vorgestellt.

### Latente Wachstumskurvenmodelle

Latente Wachstumskurvenmodelle (LGM) zählen zu den SEM. Sie beschreiben nach Schmiedek und Wolff [2010] mittlere Veränderungen und interindividuelle Unterschiede über die Zeit. Mittlere Veränderungen werden als feste Effekte anhand von Mittelwerten modelliert; zufällige Effekte stellen die individuellen Unterschiede um die mittleren Veränderungen dar und werden anhand von Varianzen dargestellt. Die individuelle Ausprägung eines Merkmals auf der Variablen  $y$  zum Messzeitpunkt  $t$  wird über die folgende Modellgleichung abgebildet [Preacher, Wichman, MacCallum, Briggs 2008]:

Formel 27: Modellgleichung eines latenten Wachstumskurvenmodells mit zwei Wachstumsfaktoren

$$Y_{ti} = \lambda_{1t}\eta_{1i} + \lambda_{2t}\eta_{2i} + \varepsilon_{ti}$$

mit:  $Y_{ti}$  individuelle Ausprägung eines Merkmals zum Zeitpunkt  $t$

$\eta_{1i}$  latente Variable (Faktor 1)

$\eta_{2i}$  latente Variable (Faktor 2)

$\lambda_{1t}$  Faktorladung von Faktor 1 zum Zeitpunkt  $t$

$\lambda_{2t}$  Faktorladung von Faktor 2 zum Zeitpunkt  $t$

$\varepsilon_{ij}$  Fehlerterm

Die Ausgangsbasis für jedes Wachstumskurvenmodell ist das mehrmalige Erfassen bzw. Messen eines Objektes oder einer Eigenschaft zu verschiedenen Messzeitpunkten. Hinzu kommt die Annahme, dass alle Messungen durch zufällige Fehler beeinflusst werden [Geiser 2010]. Sie sind als Erweiterung von Differenzenmodellen zu sehen, die nur auf zwei Messzeitpunkten basieren. Durch die Berücksichtigung von drei oder mehr Messzeitpunkten können individuelle Zustandsänderungen wesentlich präziser geschätzt werden [Newsom 2015]. Latente Wachstumskurvenmodelle ermöglichen die Untersuchung der Form von Veränderungen eines Merkmals über die Zeit [Geiser 2010]. Die Verwendung von LGM ist eine Methode, die für die Untersuchung der folgenden Fragestellungen genutzt werden kann [Preacher et al. 2008; Geiser 2010]:

- Findet eine Veränderung des Merkmals über die Zeit statt?
- Welche Form und Stärke weist diese Veränderung auf?
- Wie groß ist die mittlere Veränderung?
- Wie groß sind die interindividuellen Unterschiede hinsichtlich der Stärke der Veränderung im Vergleich zur mittleren Veränderung?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen Ausgangswert und Veränderung? Welche Stärke und Richtung weist dieser Zusammenhang auf?
- Gibt es Variablen (Kovariaten), die Unterschiede im Ausgangs- und/oder im Veränderungswert erklären können?

---

LGM sind in ihren Modellierungsmöglichkeiten sehr flexibel und können für zahlreiche Spezialfälle erweitert werden, wie z. B. bei nicht gleichmäßigen Zeitabständen zwischen einzelnen Messungen [Bollen, Curran 2006]. Sie können sowohl für manifeste als auch für latente Variablen verwendet werden. LGM erster Ordnung beinhalten je Konstrukt nur einen einzelnen Indikator, der wiederholt gemessen und als direkter Indikator für einen oder mehrere latente Wachstumskurvenfaktoren genutzt wird. LGM zweiter Ordnung beinhalten hingegen je Konstrukt und Messzeitpunkt mehrere Indikatoren zur Beschreibung einer latenten Variable [Geiser 2010].

Bei der einfachsten Form von LGM werden für die Wachstumsfaktoren lineare Ansätze verwendet. Ist der vermutete, funktionale Zusammenhang jedoch nicht-linear, kann dies ebenfalls modelliert werden. Die Modellierung erfolgt über sogenannte Intercept- und Slope-Faktoren, die den Ausgangszustand sowie die Änderungsrate über die Zeit eines Merkmals beschreiben. Der zu prüfende Zusammenhang zwischen Ausgangswert (Intercept) und Veränderungsrate (Slope) wird über die Kovarianzmatrix ermittelt [Geiser 2010].

Konditionale Wachstumskurvenmodelle werden dazu genutzt, um individuelle Unterschiede in den Ausgangswerten und den Änderungsraten durch feststehende Merkmale zu erklären. Dazu wird das Modell um Kovariaten als Prädiktoren (z. B. Verkehrsbelastung, Bauweise, Deckenmaterial, Geometrie etc.) erweitert.

### 3.9.4 Plausibilitätsprüfung und Parameterbeurteilung

Die Evaluation von SEM erfolgt anhand der Prüfung des Gesamtmodells auf Plausibilität sowie anhand des Vergleichs von Modellvarianten untereinander auf Basis von Gütekriterien. Die Beurteilung des Gesamtfits eines Modells sollte optimalerweise anhand einer Kombination aus Fitmaßen der Inferenzstatistik, absoluten Fit-Indizes und inkrementellen Fitmaßen zum Modellvergleich erfolgen [Weiber, Mühlhaus 2014]. Nach Weiber und Mühlhaus [2014] zeichnet sich ein gutes Modell insbesondere dadurch aus, wenn die empirische Varianz-Kovarianzmatrix „möglichst fehlerfrei“ vorhergesagt werden kann, das Modell mit einer möglichst geringen Anzahl an zu schätzenden Parametern auskommt und eine erhebliche Verbesserung im Vergleich zum Basismodell darstellt. Mögliche Hinweise auf Fehlspezifikationen innerhalb des Modells können bspw. negative Varianzen sowie berechnete Korrelationen  $> 1.0$  sein.

Für die Beurteilung von Modellergebnissen werden sowohl  $\chi^2$ -basierte (CFI, TLI) als auch nicht- $\chi^2$ -basierte (RMSEA, SRMR) Anpassungsindizes verwendet [Urban 2004, Mayerl 2014]. Im Gegensatz zum  $\chi^2$ -Test, welcher eine Aussage darüber trifft, ob sich die empirische und die modellimplizierte Matrix systematisch unterscheiden, erfolgt mit Hilfe der Fit-Indizes eine Quantifizierung des Ausmaßes dieser Abweichung. Als Faustformel kann daher festgehalten werden, dass mit besseren Fit-Indizes eine höhere „Korrektheit“ des Modells einhergeht. Im Folgenden werden die für die Beurteilung relevanten Indizes mit ihren zugehörigen Schwellenwerten vorgestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei nicht um feste Grenzwerte handelt und diese nicht generalisiert werden dürfen [Steinmetz 2015].

## $\chi^2$ -Test

Der  $\chi^2$ -Test liefert ein statistisches Verfahren, mit dem die Abweichungen zwischen der modell-implizierten Kovarianzmatrix und der empirischen Kovarianzmatrix beurteilt werden. Liegt ein signifikanter Unterschied vor, so sind die Abweichungen zwischen den beiden Matrizen als überzufällig zu bewerten und die Korrektheit des Modells in Frage zu stellen. Innerhalb des Modells werden die Parameter nun so geschätzt, dass die Abweichungen zwischen diesen beiden Matrizen minimiert werden. Dies erfolgt unter Anwendung der sogenannten Maximum-Likelihood-Fit-Funktion:

Formel 28: Maximum-Likelihood-Fit-Funktion

$$F_{ML} [S; \Sigma(\theta)] = \text{tr} [S \Sigma(\theta)^{-1}] + [\log |\Sigma(\theta)| - \log |S|] - q$$

mit:

$F_{ML}$	Maximum-Likelihood-Fit-Funktion
$S$	Stichproben-Kovarianzmatrix
$\Sigma(\theta)$	modell-implizierte Matrix
$q$	Anzahl der Variablen, die das Modell enthält

Der  $\chi^2$ -Wert berechnet sich nach folgender Formel:

Formel 29: Formel zur Berechnung des  $\chi^2$ -Wertes

$$\chi^2 = F_{ML} \times (N - 1)$$

mit:

$\chi^2$	$\chi^2$ -Wert
$F_{ML}$	Maximum-Likelihood-Fit-Funktion
$N$	Stichprobenumfang

Mit Hilfe des verwendeten Signifikanzniveaus sowie unter Berücksichtigung der vorliegenden Freiheitsgrade des Modells kann die Wahrscheinlichkeit einer Diskrepanz im Vergleich zu einem „korrekten“ Modell beurteilt werden. Nach Steinmetz [2015] wird in den Sozialwissenschaften mittlerweile das Ergebnis des  $\chi^2$ -Tests zwar in wissenschaftlichen Veröffentlichungen angegeben, für die Evaluation eines Strukturgleichungsmodells sei dieser Kennwert jedoch von untergeordneter Bedeutung. Dies liegt darin begründet, dass der  $\chi^2$ -Test insbesondere bei großen Stichproben bereits auf kleine Fehlparametrisierungen innerhalb eines Modells reagiert, die das theoretische Modell unberührt lassen. Die Ursache hierfür ist darin zu sehen, dass mit steigendem Stichprobenumfang der Stichprobenfehler sinkt und dadurch die Kovarianzmatrix mit zunehmendem Ausmaß als eine präzise Abbildung der Populationsmatrix angesehen werden kann [ebd]. Wesentlich zuverlässiger sei die Verwendung von Fit-Indizes, wie z. B. CFI, TLI usw. [Schermelleh-Engel, Moosbrugger, Müller 2003].

## Comparative Fit Index

Der Comparative Fit Index (CFI) ist ein Fitmaß für Abweichungen zwischen dem entwickelten Modell und den Daten. Diese Kenngröße hat sich nach Little [2013] als praktikabel zur Bewertung von SEM herausgestellt. Der CFI berechnet sich zu:

Formel 30: Berechnungsformel CFI

$$CFI = \left| \frac{(\chi_0^2 - df_0) - (\chi_t^2 - df_t)}{(\chi_0^2 - df_0)} \right|$$

mit:

- $CFI$  Comparative Fit Index
- $\chi_t^2$   $\chi^2$ -Wert des formulierten Modells
- $\chi_0^2$   $\chi^2$ -Wert des Null-Modells
- $df_0$  Anzahl der Freiheitsgrade des Null-Modells

Als Schwellenwert für einen guten Modell-Fit wird nach Weiber und Mühlhaus [2014] ein  $CFI > 0.90$  angesetzt. Little [2013] empfiehlt den folgenden Bewertungsmaßstab:

Tabelle 7: Bewertungsmaßstab CFI

CFI	< 0.85	≥ 0.85	≥ 0.90	≥ 0.95	≥ 0.99
Modell-Fit	schlecht	mittelmäßig	akzeptabel	sehr gut	hervorragend

## Tucker-Lewis-Index

Der Tucker-Lewis-Index (TLI) wird auch als Non-Normed Fit Index (NNFI) bezeichnet [Urban 2004] und wurde im Jahre 1973 ursprünglich als Bewertungsgröße von explorativen Faktorenanalysen entwickelt [Little 2013]. Er berechnet sich nach folgender Formel:

Formel 31: Berechnungsformel TLI

$$TLI = \frac{\frac{\chi_0^2}{df_0} - \frac{\chi_t^2}{df_t}}{\frac{\chi_0^2}{df_0} - 1}$$

mit:

- $TLI$  Tucker-Lewis-Index
- $\chi_t^2$   $\chi^2$ -Wert des formulierten Modells
- $df_t$  Anzahl der Freiheitsgrade des formulierten Modells
- $\chi_0^2$   $\chi^2$ -Wert des Null-Modells
- $df_0$  Anzahl der Freiheitsgrade des Null- Modells

Als Bewertungsmaßstab für einen guten Modell-Fit wird nach Weiber und Mühlhaus [2014] ein TLI > 0.90 angesetzt. Little [2013] empfiehlt analog zum CFI den folgenden Bewertungsmaßstab:

Tabelle 8: Bewertungsmaßstab TLI

TLI	< 0.85	≥ 0.85	≥ 0.90	≥ 0.95	≥ 0.99
Modell-Fit	schlecht	mittelmäßig	akzeptabel	sehr gut	hervorragend

### Root Mean Square Error of Approximation

Der Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA) ist eine inferenzstatistische Kenngröße zur Überprüfung, ob das formulierte Modell die Realität gut annähern kann. Er ist weniger streng als der  $\chi^2$ -Test formuliert, welcher die „Richtigkeit“ eines Modells überprüft. Der RMSEA beschreibt die Diskrepanz bezogen auf die Approximation [Weiber, Mühlhaus 2014] und lässt sich nach folgender Formel berechnen:

Formel 32: Berechnungsformel RMSEA

$$RMSEA = \sqrt{\frac{\max\left\{\left(\hat{F}_{ML} - \frac{df}{N-1}\right), 0\right\}}{df}} = \sqrt{\frac{\chi^2 - df}{(N-1) \times df}}$$

mit:	$RMSEA$	Root Mean Square Error of Approximation
	$\hat{F}_{ML}$	Maximum-Likelihood-Funktion
	$\chi^2$	$\chi^2$ -Wert des formulierten Modells
	$df$	Anzahl der Freiheitsgrade
	$N$	Stichprobenumfang

Der RMSEA wird als Gütekriterium von Preacher et al. [2008] empfohlen. Nach Browne und Cudeck [1993] sowie Little [2013] kann der errechnete RMSEA wie folgt interpretiert werden:

Tabelle 9: Bewertungsmaßstab RMSEA

RMSEA	> 0.10	≤ 0.10	≤ 0.08	≤ 0.05	≤ 0.01
Modell-Fit	inakzeptabel	mittelmäßig	akzeptabel	gut	sehr gut

### Standardized Root Mean Square Residual

Der Root Mean Square Residual (RMR) bzw. der Standardized Root Mean Square Residual (SRMR) sind weitere Kennzahlen zur Bewertung der Güte eines Strukturgleichungsmodells. Der RMR berechnet sich aus der Quadratwurzel des Verhältnisses aus der Summe der quadratischen Abweichungen zwischen den Varianzen bzw. Kovarianzen der empirischen und der modellbasierten Matrix und der Anzahl der insgesamt erhobenen Messvariablen (Indikatoren):

Formel 33: Berechnungsformel RMR

$$RMR = \sqrt{\frac{2 \sum \sum (s_{ij} - \sigma_{ij})^2}{p(p+1)}}$$

mit:

- $RMR$  Root Mean Square Residual
- $s_{ij}$  empirische Varianz-Kovarianz der Variablen  $x_{ij}$
- $\sigma_{ij}$  modelltheoretisch errechnete Varianz-Kovarianz der Variablen  $x_{ij}$
- $p$  Anzahl der Indikatoren

Kleine RMR-Werte deuten auf eine gute modelltheoretische Anpassung an die vorliegenden Daten hin. Nach Weiber und Mühlhaus [2014] bedeutet dabei ein Wert von Null, dass die empirischen Kovarianzen mit den modelltheoretischen übereinstimmen und somit von einem perfekten Fit gesprochen werden kann. Als kritischen Schwellenwert zur Beurteilung der Güte eines Modells geben Weiber und Mühlhaus [2014] einen Wert von  $RMR \leq 0.06$  an. Ein Nachteil des RMR liegt darin, dass die Höhe von Varianzen und Kovarianzen in Abhängigkeit der Skalierung der Indikatoren variiert. Dies kann jedoch mit Hilfe des Standardized Root Mean Square Residual (SRMR) vermieden werden. Der Standardized Root Mean Square Residual (SRMR) basiert auf der Berechnung des RMR, wobei die quadrierten Differenzen durch das Produkt der empirischen Varianzen der Variablen  $i$  und  $j$  bereinigt werden. Der SRMR berechnet sich dementsprechend wie folgt:

Formel 34: Berechnungsformel SRMR

$$SRMR = \sqrt{\frac{2 \sum \sum \left( \frac{s_{ij} - \sigma_{ij}}{s_{ii}s_{jj}} \right)^2}{p(p+1)}}$$

mit:

- $SRMR$  Standardized Root Mean Square Residual
- $s_{ij}$  empirische Varianz-Kovarianz der Variablen  $x_{ij}$
- $\sigma_{ij}$  modelltheoretisch errechnete Varianz-Kovarianz der Variablen  $x_{ij}$
- $p$  Anzahl der Indikatoren

Der SRMR gilt als eines der wichtigsten Gütekriterien zur Beurteilung von Strukturgleichungsmodellen [Weston, Gore 2006]. Nach Weiber und Mühlhaus [2014] kann der errechnete SRMR wie folgt interpretiert werden:

Tabelle 10: Bewertungsmaßstab SRMR

SRMR	> 0.10	≤ 0.10	≤ 0.05	≤ 0.01
Modell-Fit	schlecht	akzeptabel	gut	sehr gut

---

### 3.10 Kapitelzusammenfassung

Der Blick in die Literatur zeigt, dass für eine probabilistische Modellierung von Zustandsentwicklungen grundsätzlich mehrere methodische Ansätze sowie deren Kombination untereinander denkbar sind. Zu den bekanntesten probabilistischen Methoden zählen der Markov-Prozess, die Survival-Analyse und Ansätze der Bayes'schen Statistik. Diese Methoden lassen sich hinsichtlich des Aufwands bei der Datenaufbereitung, den Möglichkeiten zur Modellierung von Zuständen und Zustandsverläufen, der Berücksichtigung von Messunsicherheiten sowie ihrer Komplexität unterscheiden. Unabhängig des gewählten Ansatzes ermöglichen sie im Hinblick auf den Prozess der Entscheidungsfindung von Zeitpunkt und Art von Erhaltungsmaßnahmen eine Abbildung der Risiken verschiedener Entwicklungsszenarien für eine verbesserte Entscheidungsgrundlage. Eine großflächige Umsetzung von probabilistischen Prognosemodellen im Erhaltungsmanagement von Bundesfernstraßen konnte bisher aus verschiedenen Gründen noch nicht erfolgen [Oertelt 2007].

Auf internationaler Ebene zählt der Markov-Prozess aufgrund des geringen Aufwands bei der Datenaufbereitung und seiner begrenzten Komplexität zu den am meistverbreiteten Methoden. Dieser Ansatz beinhaltet jedoch eine Reihe an methodischen Nachteilen, sodass er für eine Modellierung der Zustandsentwicklung nur bedingt geeignet ist. Die Mehrzahl der Untersuchungen basiert auf homogenen Übergangswahrscheinlichkeiten. Damit einhergehend ist die Annahme verbunden, dass sich der Zustand einer Straße völlig zufällig ändert und dementsprechend die Wahrscheinlichkeit für eine Zustandsänderung konstant ist. Der Zustandsparameter wird als eine zufällige und zeitunabhängige Größe betrachtet. Methodische Erweiterungen des homogenen Markov-Prozesses mit Hilfe von inhomogenen Übergangswahrscheinlichkeiten oder Semi-Markov-Prozessen ermöglichen eine teilweise Behebung dieser nachteiligen Eigenschaften. Deren Anwendung ist jedoch oftmals durch eine zu geringe Datenmenge sowie die Qualität der vorliegenden Daten begrenzt [Oeser et al. 2014] und führt dazu, dass eine detaillierte Untersuchung zur Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeiten bisher nicht erfolgt ist [Weninger-Vycudil et al. 2009]. Aufgrund der meist nicht ausreichend vorliegenden Datenmenge sind bisher kaum Analysen zur Verteilungsform von Übergangswahrscheinlichkeiten auf Basis von Zustandsgrößen bekannt. Nach Socina [2007] und Oeser et al. [2014] wird die Problematik dadurch verstärkt, dass die Voraussetzungen für die meisten statistischen Verfahren zum Überprüfen der Verteilungsform, wie etwa die Annahme auf Normalverteilung, nicht erfüllt werden.

Für eine Anwendung der Survival-Analyse wird zunächst nur zwischen einem „Überleben“ oder einem „Ausfall“ einer Fahrbahnoberfläche differenziert. Hierzu muss zunächst ein Grenzwert für das Erreichen eines „Ausfalls“ definiert werden. Zudem wird vorausgesetzt, dass der Verlauf der Zustandsentwicklung sowie die Verteilungsfunktion bekannt und über den Prognosezeitraum konstant sind. Die Ermittlung von abschnittsbezogenen Zustandsentwicklungen stellt jedoch aufgrund einer geringen Anzahl an Messergebnissen je Auswerteabschnitt, der Abhängigkeit von einer Vielzahl an Einflussfaktoren und deren Überlagerung sowie Messunsicherheiten bei der Zustandserfassung eine besondere Herausforderung dar.

Im Vergleich zum Markov-Prozess und der Survival-Analyse bietet die Bayes'sche Statistik hingegen die Vorteile, dass sie sowohl die bei der Zustandserfassung vorhandenen Messunsicherheiten als auch die zugrundeliegende mechanistische Schadensentwicklung innerhalb eines Modells explizit abbilden kann.

Während die beim Markov-Prozess häufig angewendete Vorgehensweise zur Ermittlung von Übergangswahrscheinlichkeiten eine Berücksichtigung von gemessenen Zustandsverbesserungen kate-

---

gorisch ausschließt, kann der Bayes'sche Ansatz die Frage des Umgangs mit gemessenen Zustandsverbesserungen [vgl. Hinsch et al. 2005; Oertelt 2007; Weninger-Vycudil et al. 2009] adressieren. Auch international liegen bisher kaum Erfahrungen vor, wie mit Hilfe von statistischen Methoden mit diesen messunsicherheitsbehafteten Daten umgegangen werden kann [Solorio et al. 2017; Simpson et al. 2018; Bryce, Rada 2018]. Es ist daher notwendig, eine geeignete Methodik zu entwickeln, die diese Messunsicherheiten abbilden und bei der Auswertung der Daten berücksichtigen kann. Die Bayes'sche Statistik stellt hierfür ein geeignetes Verfahren bereit, das es erlaubt, sowohl das Wissen zum mechanistischen Werkstoffverhalten aus Laborversuchen oder eines Expertensystems als auch die erfassten, messabweichungsbehafteten Zustandsdaten miteinander zu kombinieren, sodass ein systematischer Ausschluss von Zustandsverbesserungen vermieden wird. Damit kann eine Vielzahl an Nachteilen des homogenen Markov-Prozesses als auch der Survival-Analyse überwunden werden, sodass eine gezieltere probabilistische Prognose möglich erscheint.

Für das Aufdecken von theorie- und evidenzbasierten Zusammenhängen innerhalb des komplexen Systems der Zustandsentwicklung einer Straße wurde zum Abschluss des Kapitels die Methodik der Strukturgleichungsmodellierung vorgestellt. In Anlehnung an die Grundlagen der Bayes'schen Statistik erlaubt die Methode eine Differenzierung zwischen einem System- und einem Messmodell. Da mit Hilfe dieser bisher vorrangig in den Sozialwissenschaften eingesetzten Methode Einfluss- und Wechselwirkungen zwischen latenten (nicht direkt beobachtbaren) Variablen geschätzt werden können, soll ihre Anwendbarkeit zur Analyse der Zustandsentwicklung von Straßen in dieser Arbeit erprobt werden (vgl. Kapitel 6).



## 4 Datengrundlage der ZEB-Dauermessstrecke BAB A5

### 4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird die empirische Datengrundlage vorgestellt, die für die Entwicklung und Validierung der in dieser Arbeit enthaltenen probabilistischen Analyse- und Prognosemodelle verwendet wird. Die Datengrundlage umfasst Zustands-, Verkehrs- und Aufbaudaten sowie detaillierte Dokumentationen zu Erhaltungsmaßnahmen der ZEB-Dauermessstrecke (DMS) in Hessen. Das 2011 begonnene Projekt zeichnet sich durch eine sehr dichte Datengrundlage aus und ermöglicht dadurch die gezielte Untersuchung einzelner Fragestellungen innerhalb der Straßenerhaltung, wie z. B. die Analyse und Prognose der Zustandsentwicklung von Oberflächenmerkmalen.

### 4.2 Einführung

Auf einem 76,1 km langen Teilabschnitt der Bundesautobahn BAB A5 in Hessen nördlich von Frankfurt zwischen den Anschlussstellen ‚Gambacher Kreuz‘ (Betriebskilometer 448+343) und ‚Hattenbacher Dreieck‘ (Betriebskilometer 372+199) befindet sich eine Untersuchungsstrecke für Langzeitbeobachtungen (vgl. Abbildung 48).

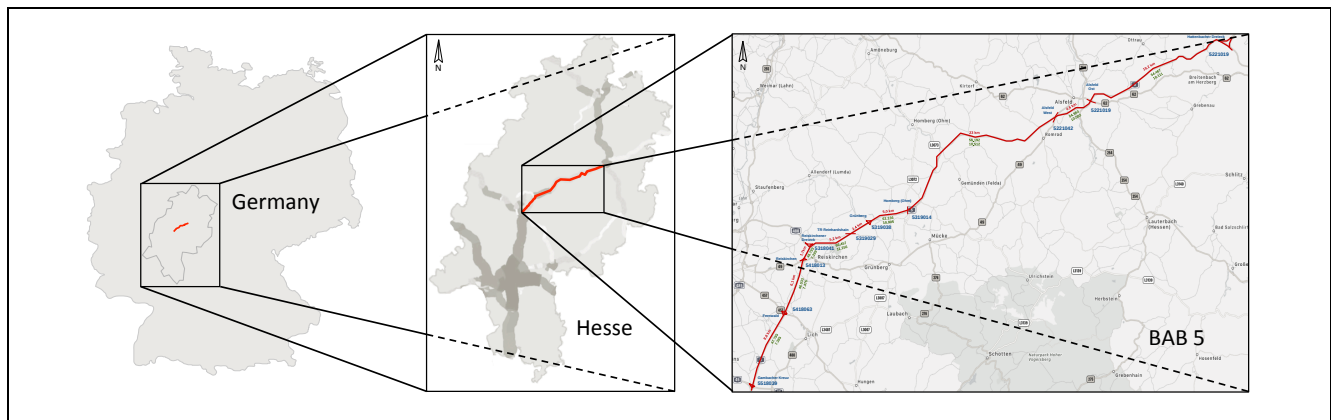


Abbildung 48: Lageplan der ZEB-Dauermessstrecke BAB A5 in Hessen [Blumenfeld 2019]

Seit 2011 wird auf Initiative der Hessischen Straßenbauverwaltung (Hessen Mobil) und auf Beschluss der Bund-Länder-Dienstbesprechung Erhaltung dieses Teilstück der BAB A5 hinsichtlich des Fahrbahnzustandes untersucht. Die Datenerhebung erfolgt zweimal jährlich im Rahmen der bundesweiten ZEB mit schnellfahrenden Messfahrzeugen. Erfasst werden Unebenheiten in Längs- und Querrichtung, die Griffigkeit und Oberflächenschäden der Fahrbahn. In Zusammenarbeit mit der BAST koordiniert Hessen Mobil die auf der DMS durchgeführten Messungen und ist verantwortlich für die kontinuierliche Erhebung von weiteren Begleitdaten.

Das Ziel dieses begonnenen Projektes ist es, eine dichte Datengrundlage für wissenschaftliche Fragestellungen im Bereich der Straßenerhaltung und der Qualitätssicherung der ZEB-Prozesse zu schaffen [Bergmann-Syren, Smet, Komma, Skakuj 2017].

Im Rahmen des Projektes der DMS werden durch Hessen Mobil kontinuierlich, zusätzlich zu den routinemäßig durchgeführten ZEB, folgende erhaltungsrelevante Daten erhoben bzw. dokumentiert:

- Zustandsdaten
- Verkehrsdaten
- Daten der betrieblichen und baulichen Erhaltung
- Aufbaudaten
- Klimadaten

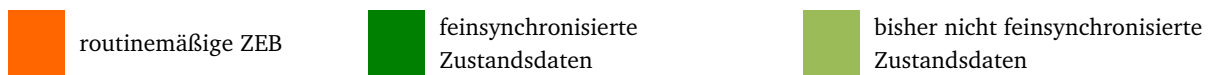
Im Nachfolgenden werden der Umfang sowie der Detaillierungsgrad bei der Dokumentation dieser Datengrundlagen erläutert.

### 4.3 Zustandsdaten

Zur Beurteilung des aktuellen Zustandes der Straßeninfrastruktur wird in regelmäßigen Zeitabständen eine ZEB durchgeführt. Die Erfassung des Oberflächenzustandes erfolgt hierbei mit den üblichen schnellfahrenden Messsystemen (vgl. Kapitel 2.6.2.3). Die Zustandsmerkmale beinhalten die Längs- und Querebenheit (TP 1), die Griffigkeit (TP 2) sowie die Substanzmerkmale (Oberfläche) (TP 3) (vgl. Kapitel 2.6.2.2). Die Tabelle 11 gibt einen Überblick zu den seit 2005 durchgeführten ZEB auf diesem Streckenabschnitt.

Tabelle 11: Übersicht zu den seit 2005 durchgeführten ZEB-Kampagnen auf der ZEB-Dauermessstrecke [Blumenfeld in Vorbereitung]

Jahr	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
routinemäßige ZEB															
halbjährliche ZEB															



Zusätzlich zu den alle vier Jahren durchgeführten ZEB-Messkampagnen wird halbjährlich, jeweils im Frühjahr und im Herbst, der Zustand der Fahrbahnoberfläche erfasst. Da die Zustandserfassungen analog zu den routinemäßig durchgeführten ZEB-Kampagnen ausgeschrieben werden, wurden die Zustandsmerkmale von differierenden Betreibern mit diversen Messsystemen erfasst. Die Tabelle 12 gibt einen Überblick zu den beauftragten Betreibern und den eingesetzten Messsystemen je Messkampagne.

Tabelle 12: Übersicht zu den Betreibern und den eingesetzten Messsystemen je Messkampagne auf der ZEB-Dauermessstrecke

Jahr der Erfassung		Teilprojekte 1 + 3	Teilprojekt 2
2011	Frühjahr	TÜV Rheinland Schniering (ARGUS 6)	GöKy Messsystems (SKM)
	Herbst		
2012	Frühjahr	Lehmann + Partner GmbH (STIER)	TÜV Rheinland Schniering (SKM2)
	Herbst		
2013	Frühjahr	Lehmann + Partner GmbH (STIER)	TÜV Rheinland Schniering (SKM2)
	Herbst		
2014	Frühjahr	TÜV Rheinland Schniering (ARGUS 7)	TÜV Rheinland Schniering (SKM2)
	Herbst		
2015	Frühjahr	TÜV Rheinland Schniering (ARGUS 7)	TÜV Rheinland Schniering (SKM2)
	Herbst		TÜV Rheinland Schniering (SKM1)
2016*	Frühjahr	TÜV Rheinland Schniering (ARGUS 8)	GöKy Messsystems (SKM)
	Herbst		
2017*	Frühjahr	TÜV Rheinland Schniering (ARGUS 8)	TÜV Rheinland Schniering (SKM1)
	Herbst	TÜV Rheinland Schniering (ARGUS 6)	
2018*	Frühjahr	IFI Consult	TÜV Rheinland Schniering
	Herbst		
2019*	Frühjahr	TÜV Rheinland Schniering	GöKy Messsystems (SKM)
	Herbst		
* bisher nicht feinsynchronisiert			

Die seit dem Frühjahr 2011 halbjährlich durchgeführten Erfassungen erfolgen auf allen Fahrstreifen jeweils in Hin- und Rückrichtung. Um zukünftig exakte Aussagen zum Schadensverlauf einzelner Zustandsmerkmale treffen zu können, ist die örtliche Zuordnung der Messstrecken von großer Relevanz. Dies ist von enormer Bedeutung, da eine nicht exakte Lokalisierung sowie der Einsatz verschiedenartiger Messsysteme einen Vergleich mehrerer ZEB-Messkampagnen deutlich erschwert [Bergmann-Syren et al. 2017]. Im Rahmen eines Forschungsauftrages [Skakuj, Komma 2016] erfolgte daher eine Datenaufbereitung der ZEB-Messkampagnen Frühjahr 2011 bis Herbst 2015, die folgende Arbeitsschritte beinhaltet:

## 1. Eindeutige Festlegung und Vereinheitlichung des Umfangs der DMS

Dazu zählte u. a. die exakte Festlegung der Start- und Endpunkte des Streckenabschnittes

## 2. Berichtigung der Fahrstreifenzuordnung

In zwei Streckenabschnitten der ZEB-Dauermessstrecke befinden sich für den Schwerverkehr angelegte Lastspuren, die über eine eigene abgetrennte Fahrbahn mit einer geringeren Längsneigung verfügen. Da diese Fahrbahnen während der einzelnen Messkampagnen durch die jeweiligen Messbetreiber verschiedene Fahrstreifennummern erhielten, mussten diese Informationen vereinheitlicht werden.

## 3. Definieren einer „Bezugs-Messkampagne“

Des Weiteren wurde eine Messkampagne festgelegt, die im Rahmen einer Feinsynchronisierung als Bezugsstrecke zu den anderen Messkampagnen herangezogen wird.

## 4. Feinsynchronisierung der Messdaten

Die ZEB-Rohdaten werden für jedes Zustandsmerkmal in einer lateralen Auflösung von 1 m erfasst. Gleichwohl ist die Genauigkeit von GPS-Systemen bei der Lokalisierung von ZEB-Daten begrenzt. Zudem variiert die Genauigkeit der Verknüpfung von GPS-Koordinaten mit den erfassten ZEB-Rohdaten je nach verwendetem Messsystem. Die Überlagerung dieser beiden Einflüsse bewirkt in der Regel einen Versatz der Messlinien einzelner Messungen in Längsrichtung zwischen 10 m und 20 m [Bergmann-Syren et al. 2017]. Bei einer Untersuchung von Zustandsentwicklungen hingegen ist die exakte Zuordnung der Streckenabschnitte essentiell. Die einzelnen ZEB-Messkampagnen wurden daher metergenau feinsynchronisiert. Dazu wurde ein eigens für diese Fragestellung entwickelter halb-automatischer Algorithmus angewendet. Hierbei wurden insbesondere anhand der Oberflächenbilder die „Bezugs-Kampagne“ und eine weitere Messkampagne mit Hilfe von charakteristischen Festpunkten miteinander verglichen und die Messprofile in Längsrichtung angeglichen.



Abbildung 49: Gegenüberstellung zweier Messkampagnen anhand von Befahrungsaufnahmen und Oberflächenbildern [Skakuj, Komma 2016]

Die durchgeführte Feinsynchronisierung der Zustandsdaten bildet die Grundlage für den Vergleich verschiedener Messkampagnen. Durch die laterale Verschiebung bei der Erfassung und der Rasterung der Zustandsdaten werden anderenfalls nicht exakt die gleichen Streckenbereiche miteinander verglichen (vgl. Abbildung 50), was die Qualität von Zustandsanalysen deutlich mindert [Skakuj, Komma 2016].

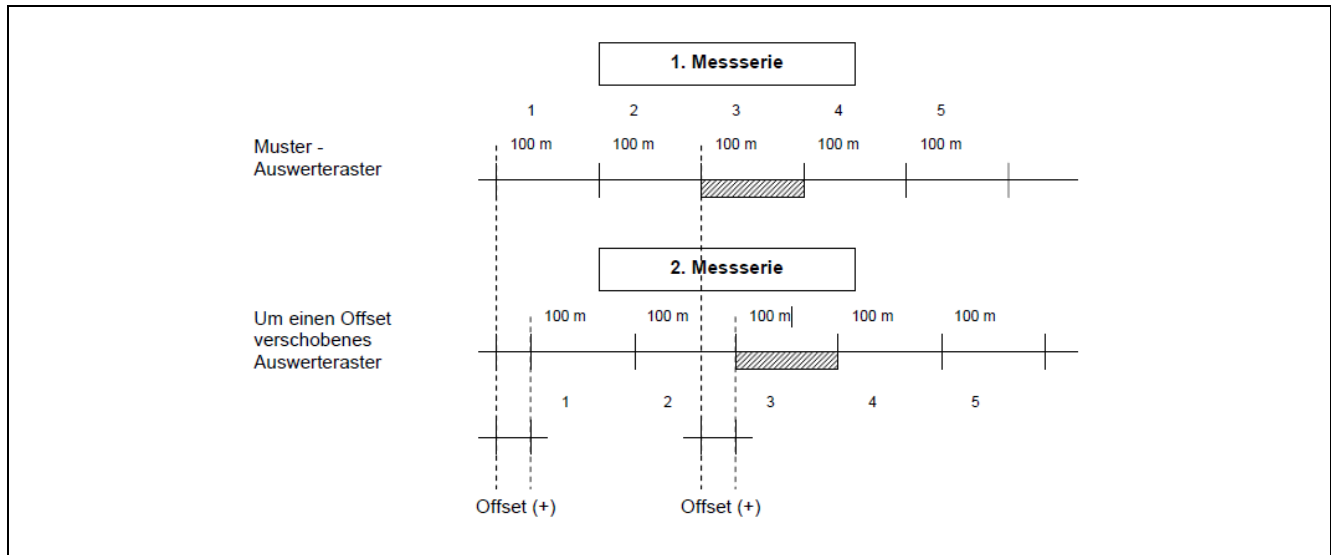


Abbildung 50: Verschiebung des Auswerterasters in Relation zum Muster-Auswerteraster [Skakuj, Komma 2016]

Die feinsynchronisierten Daten der Zustandserfassungen (TP 1 bis TP 3) werden auf dem IT-ZEB-Server der BAST verwaltet und können dort u. a. als Rohdaten, aufbereitete Ergebnistabellen oder Streckenbänder abgerufen werden.

In der Abbildung 51 sind beispielhaft die Häufigkeitsverteilungen der Zustandswerte je Zustandsmerkmal für die Messkampagne im Herbst 2015 dargestellt.

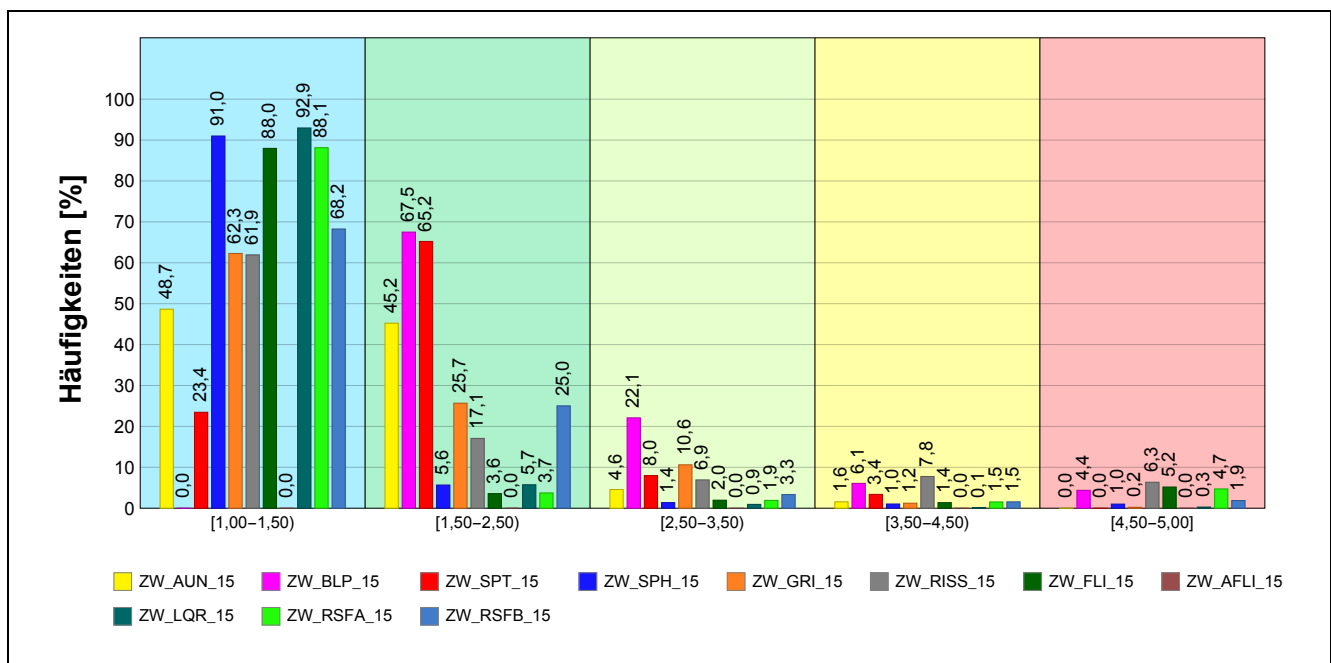


Abbildung 51: Häufigkeitsverteilungen der Zustandswerte im Herbst 2015 [BAST 2018]

Die mit einer Genauigkeit von ca.  $\pm 1$  m feinsynchronisierten Zustandsdaten erlauben Analysen zur Ausprägung einzelner Schadensmerkmale sowie deren Zustandsentwicklung. Nach Bergmann-Syren et al. [2017] sollen sie als Datengrundlage für zukünftige Forschungsarbeiten dienen, um wichtige Fragestellungen innerhalb des Erhaltungsmanagements untersuchen zu können:

- Analyse des Zustandes und der Zustandsentwicklung des Teilnetzes
- Untersuchung des Einflusses des Schwerverkehrs
- Untersuchung von Klimaeinflüssen
- Erprobung neuer Erfassungsmerkmale
- Beantwortung straßenbautechnischer Fragestellungen

In der Abbildung 52 sind exemplarisch die kumulierten Häufigkeitsverteilungen der Zustandsgröße MSPT für die ZEB-Kampagnen Frühjahr 2011 und Frühjahr 2015 dargestellt. Im Mittel über alle Auswerteabschnitte der DMS beträgt die mittlere Spurrinnentiefe 3,8 mm mit einer Standardabweichung von 2,6 mm. Der Vergleich der beiden Summenlinien zeigt eine fast identische Zustandsverteilung.

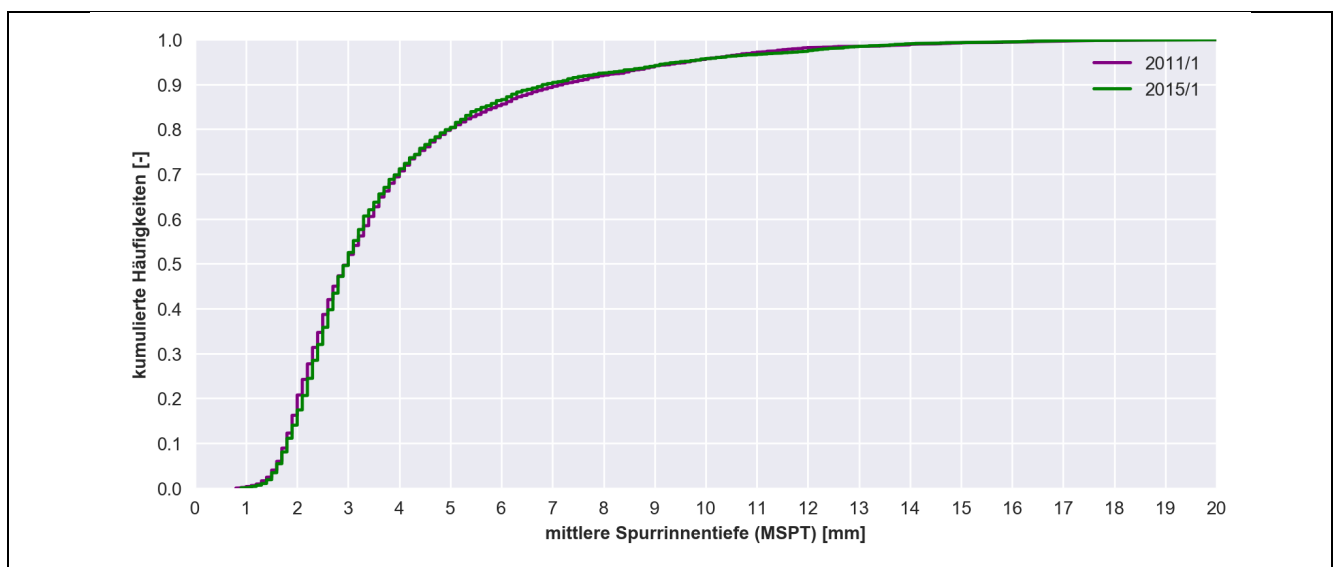


Abbildung 52: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der Zustandsgröße MSPT im Frühjahr 2011 und 2015

Eine Unterteilung der Zustandsausprägung je Fahrstreifen verdeutlicht den Einfluss der Verkehrsbelastung. Die vorrangig nur von Personenkraftwagen befahrenen Überholfahrstreifen (FS 2 und FS 3) weisen im Vergleich zu dem vom Schwerverkehr befahrenen Hauptfahrstreifen (FS 1) eine deutlich geringere mittlere Spurrinnentiefe auf. Über alle Auswerteabschnitte des ersten Fahrstreifens einschließlich der Lastspur liegt die mittlere Spurrinnentiefe bei durchschnittlich 4,8 mm mit einer Standardabweichung von 3,2 mm. In den restlichen Fahrstreifen hingegen ist diese mit einer mittleren Spurrinnentiefe von ca. 2,8 mm bzw. 2,9 mm und einer Standardabweichung von 1,1 mm bzw. 1,2 mm weniger stark ausgeprägt (vgl. Abbildung 53).

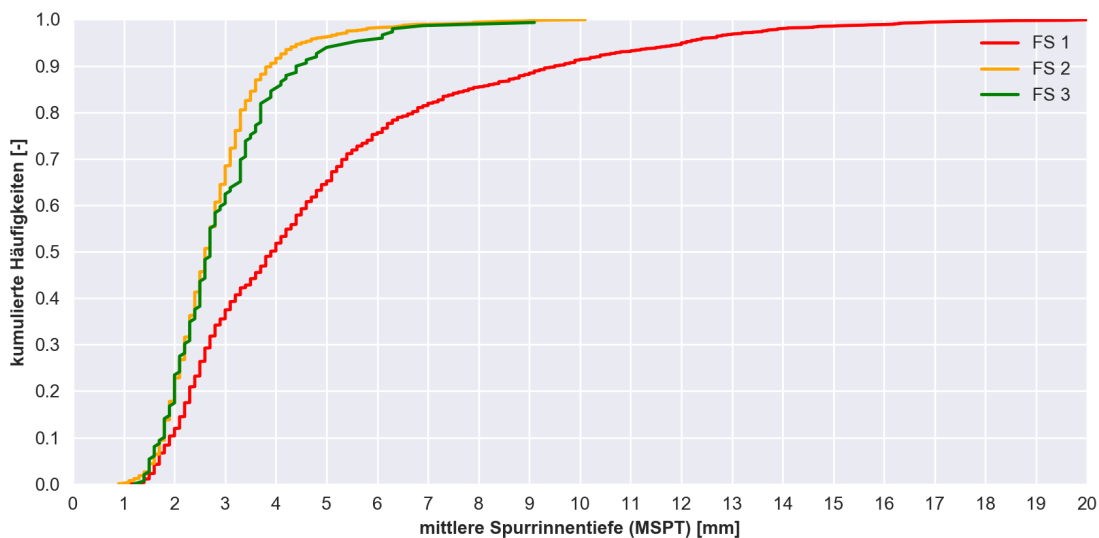


Abbildung 53: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der Zustandsgröße MSPT je Fahrstreifen im Frühjahr 2015

#### 4.4 Verkehrsdaten

Entlang des Streckenabschnittes der DMS befinden sich insgesamt sieben Verkehrszählstellen, die die vorliegenden Verkehrsstärken erfassen (vgl. Tabelle 13). Entlang des Streckenabschnittes verteilt sich der Verkehr auf zwei Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn.

Tabelle 13: Übersicht der Verkehrszählstellen der ZEB-Dauermessstrecke

Zählstellen- Nummer	Zählabschnittsanfang	Zählabschnittsende
52216811	AS Alsfeld-Ost	AS Alsfeld-West
52210812	AS Alsfeld-West	AS Homberg (Ohm)
53190813	Anschl. L3072	Anschl. L3127
53190900	AS Grünberg	AD Reiskirchener Dreieck
53186814	AD Reiskirchener Dreieck	AS Reiskirchen
54186815	AS Reiskirchen	AS Fernwald
55186816	AS Fernwald	AK Gambacher Kreuz

Entlang der DMS variierte die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) zum Zeitpunkt der Straßenverkehrszählung 2015 zwischen 46.533 Kfz/24h und 66.457 Kfz/24h. Die durchschnittliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs ( $DTV_{sv}$ ) betrug je nach Zählstelle zwischen 7.289 Kfz/24h und 11.256 Kfz/24h. In der Abbildung 54 sind die DTV-Werte der Straßenverkehrszählungen 2005, 2010 und 2015 je Zählstelle dargestellt.

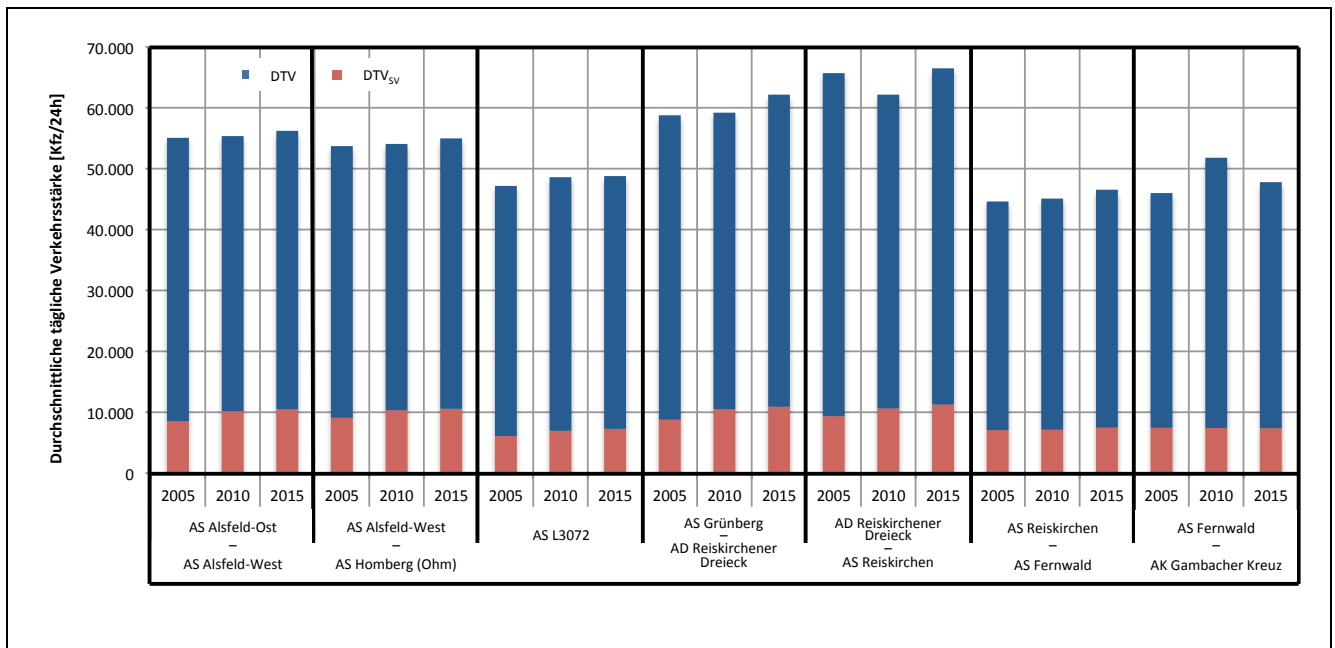


Abbildung 54: Durchschnittliche tägliche Verkehrs- (DTV) und Schwerverkehrsstärken (DTV<sub>sv</sub>) an den Zählstellen der ZEB-Dauermessstrecke in den Jahren 2005, 2010 und 2015

#### 4.5 Daten der betrieblichen und baulichen Erhaltung

Die auf dem Streckenabschnitt der DMS durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen werden in regelmäßigen Zeitabständen von den zuständigen Straßenmeistereien gemeldet. Um die durchgeführten Maßnahmen sehr detailliert dokumentieren zu können, wurde ein Kategorisierungssystem von Hessen Mobil entwickelt. Hierzu wurde unterschieden nach:

- Art der Erhaltungsmaßnahme
- Lage (Betriebskilometer, Fahrtrichtung und Fahrstreifen)
- Ursache zur Durchführung der Erhaltungsmaßnahme

Die Angabe der Art der Erhaltungsmaßnahme orientiert sich an der Begriffssystematik der Straßenerhaltung. In der Tabelle 14 sind die Kategorien zur Dokumentation der Art der durchgeführten Erhaltungsmaßnahme sowie zugehörige Beispiele dargestellt.



Tabelle 14: Dokumentierte Arten von Erhaltungsmaßnahmen

Kürzel	Bezeichnung	Beispiele
U-I1	Bauliche Instandhaltung	Risse vergießen, Fugenpflege, Flickarbeiten, Ausbesserungen mit Kaltasphalt, kleinflächige Dünnschichtbeläge
DE-I2	Instandsetzung	Deckschichternewerung, Dünne Schichten, Oberflächenbehandlung
DE-E1	Erneuerung	Deckenernewerung (Deck- und Binderschicht bzw. Betondecke)
GE-E2	Erneuerung	Grundernewerung (gesamter Oberbau inkl. Tragschicht)
BW-INST	Bauwerksinstandsetzung	Austausch der Widerlager
BW-ERN	Bauwerksernewerung	–
A	Um- und Ausbau	Anbau von Seitenstreifen; Kurvenbegradigung
N	Neubau	–

Die Dokumentation der betroffenen Richtungsfahrbahn (R/L in Stationierungsrichtung) erfolgte anhand der Angabe der Fahrtrichtung. In der Tabelle 15 sind die beiden Kategorien zur Dokumentation der betroffenen Fahrtrichtung der durchgeführten Erhaltungsmaßnahme dargestellt.

Tabelle 15: Dokumentierte Angaben zur betroffenen Fahrtrichtung der Maßnahmen

Kürzel	Bezeichnung
Frankfurt	Fahrtrichtung Frankfurt (Westen bzw. Süden)
Kassel	Fahrtrichtung Kassel (Osten bzw. Norden)

Die Kausalität zum Durchführen einer betrieblichen oder baulichen Maßnahme wird anhand von vier Kategorien beschrieben. In der Tabelle 16 sind diese Kategorien zur Dokumentation der Ursache zur Durchführung einer Erhaltungsmaßnahme sowie ein zugehöriges Beispiel dargestellt.

Tabelle 16: Kategorien zu Ursachen zur Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen

Bezeichnung	Beispiele
Unfall	Unfall mit Beeinträchtigung der Fahrbahnoberfläche (Flüssigkeit, Brand)
Witterung	Rutschung, Abbruch, Überspülung (24h)
Verschmutzung	Baustellenverkehr, Ladung
Sonstiges	–

Die Tabelle 17 zeigt zwei fiktive Beispiele für die Meldung einer Erhaltungsmaßnahme (Deckenernewerung) und eines sonstigen Einsatzes der Straßenmeistereien (Verkehrsunfall) und gibt einen Eindruck zu dem Detaillierungsgrad der Dokumentation dieser Ereignisse.

Tabelle 17: Fiktive Beispiele für die Meldung von Erhaltungsmaßnahmen und anderen Ereignissen

Angaben zur Erhaltungsmaßnahme		Beispiel 1	Beispiel 2
Zeitraum	Beginn	04.04.2011	06.06.2011
	Ende	05.05.2011	06.06.2011
Ereignis-Art		–	Unfall
Art der Maßnahme		DE-E1	–
Beschreibung		Einbau SMA LA	Gefahrguttransporter umgekippt, 3.000 l Rohöl verloren
Betroffene Strecke	von BKM	397,2	419,3
	bis BKM	391,4	419,6
Fahrtrichtung		Kassel	Frankfurt
Betroffene Fahrstreifen		Standstreifen (S), 1. Fahrstreifen (1)	Standstreifen (S), 1. Fahrstreifen (1)
Verkehrsführung		3 + 1	–
Baustellenbereich	von BKM	340,1	–
	bis BKM	390,7	–
Gespernte Fahrstreifen (> 24h)			S, 1
Bemerkungen			Warnschild Ölspur
Beteiligte Dienststellen		AM Schotten	AM Schotten, HABB
Bearbeiter		–	–

Eine Auswertung aller dokumentierten Erhaltungsmaßnahmen zwischen den Jahren 2011 und 2015 zeigt, dass der Großteil der dokumentierten Maßnahmen auf dem Standstreifen und dem ersten Fahrstreifen durchgeführt wurde. Des Weiteren bilden Maßnahmen der baulichen Instandhaltung, die u. a. Tätigkeiten wie etwa das Vergießen von Rissen, Fugenpflege, Flickarbeiten und sonstige Ausbesserungen beinhalten, mit einer Gesamtlänge von ca. 300 km den größten Anteil aller durchgeführten Erhaltungsaktivitäten. Instandsetzungsmaßnahmen und Deckenerneuerungen wurden zu gleichen Teilen mit einer jeweiligen Länge von ca. 40 km umgesetzt. In der Abbildung 55 ist ein Überblick zu den durchgeführten Maßnahmen der betrieblichen und baulichen Erhaltung auf der DMS für den Zeitraum von 2011 bis 2015 gegeben.

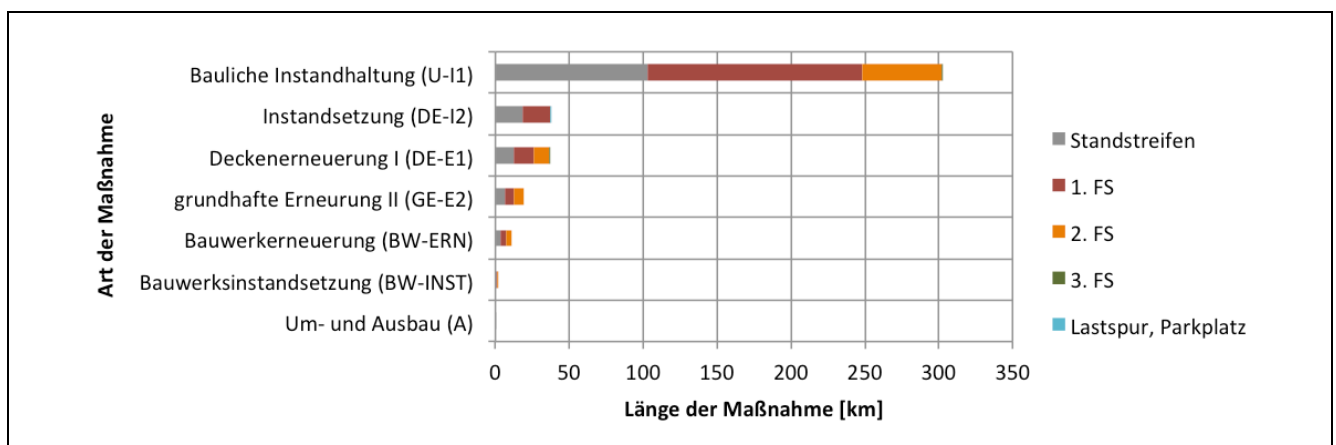


Abbildung 55: Überblick zu durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen auf der ZEB-Dauermessstrecke im Zeitraum 2011-2015

## 4.6 Aufbaudaten

Der Streckenabschnitt der DMS beinhaltet sowohl Fahrbahnen in Asphalt- als auch in Betonbauweise. Etwa 77 % aller Streckenabschnitte sind in Asphalt- und 22 % in Betonbauweise hergestellt (vgl. Tabelle 18). Ein Großteil aller Abschnitte weist eine Deckschicht in Gussasphaltbauweise auf.

Tabelle 18: Anzahl an 100-m-Auswerteabschnitten in Abhängigkeit der Bauweise und der Fahrstreifennummer der ZEB-Dauermessstrecke

			Fahrstreifen		
			1	2	3
Bauweise	Asphalt	Asphaltbeton	36 (2,0 %)	18 (1,1 %)	0 (0,0 %)
		Splittmastixasphalt	140 (7,8 %)	215 (12,6 %)	24 (31,2 %)
		Gussasphalt	1.219 (67,6 %)	1.064 (62,4 %)	46 (59,7 %)
	Beton		400 (22,2 %)	389 (22,8 %)	4 (5,2 %)
	n. b.		7 (0,4 %)	18 (1,1 %)	3 (3,9 %)
Fahrstreifenbezogene Summen			1.802 (100,0 %)	1.704 (100,0 %)	77 (100,0 %)

Detaillierte Daten zum Schichtenaufbau liegen für die DMS als Kartenbänder und in tabellarischer Form vor. In unterschiedlichen Abständen zur Trassenachse (5,0 m, 8,5 m und 12,0 m) sind entlang der Längsachse der Strecke für den Standstreifen (FS 0), den Hauptfahrstreifen (FS 1) und die Überholfahrstreifen (FS 2 und FS 3) Informationen zum vorliegenden konstruktiven Aufbau vorhanden. Je Aufbauquerschnitt liegen die folgenden Informationen vor:

- von Netzknoten
- nach Netzknoten
- Stationierungsbeginn
- Stationierungsende
- Schichtarten
- Einbaudatum (Jahr/Monat)
- Schichtdicken

Die Abbildung 56 zeigt exemplarisch einen Querschnitt zum Schichtenaufbau über beide Richtungsfahrbahnen.

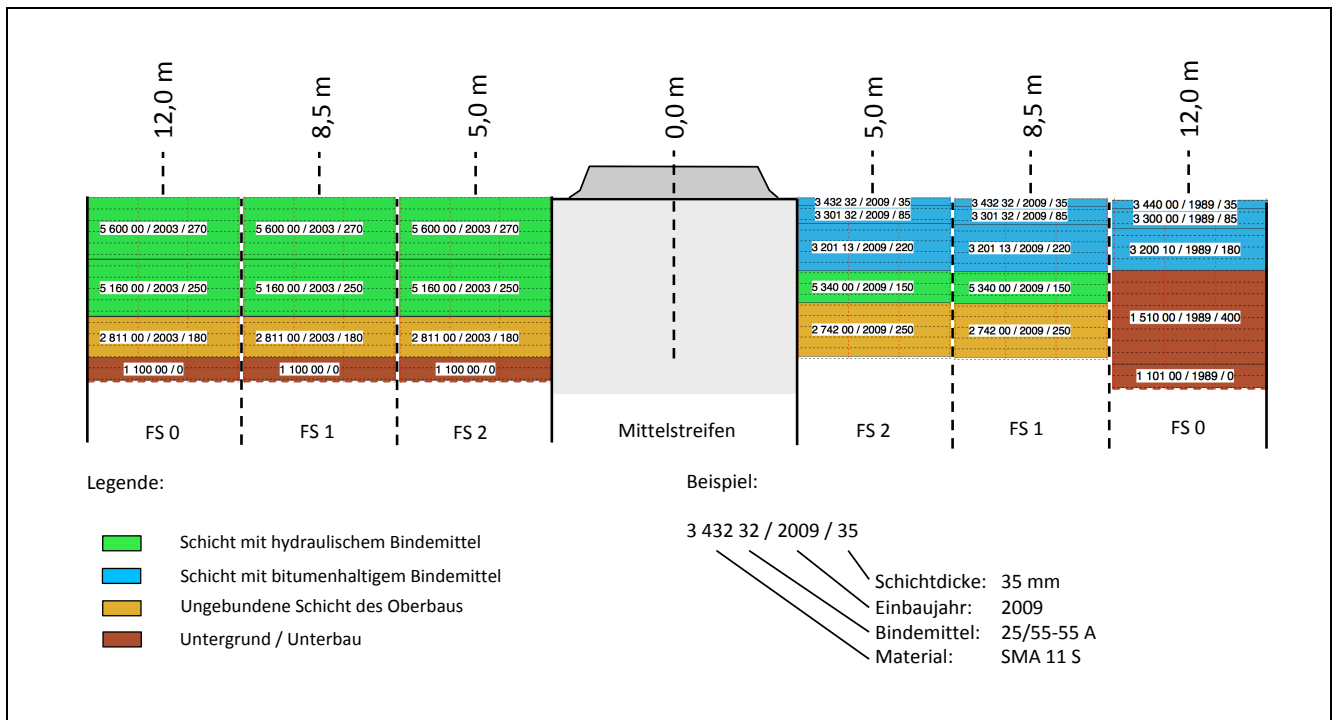


Abbildung 56: Beispiel eines Querschnitts zum Schichtenaufbau der ZEB-Dauermessstrecke

Anhand der dokumentierten Erhaltungsmaßnahmen und Einbaudaten je Schicht wurden die Liegezeiten der obersten Schicht (Asphaltdeckschicht bzw. Betondecke) zum Zeitpunkt der letzten feinsynchronisierten Zustandserfassung im Herbst 2015 berechnet. Das Alter der Asphaltdeckschicht bzw. der Betondecke variierte zwischen 0 und 41 Jahren. Im Mittel über alle Auswertabschnitte beträgt das Alter der obersten Schicht 14,3 Jahre. Die kumulierten Häufigkeiten der Liegezeiten der Deckschicht aller Auswerteabschnitte der ZEB-Dauermessstrecke im Herbst 2015 sind in der nachfolgenden Abbildung 57 dargestellt.

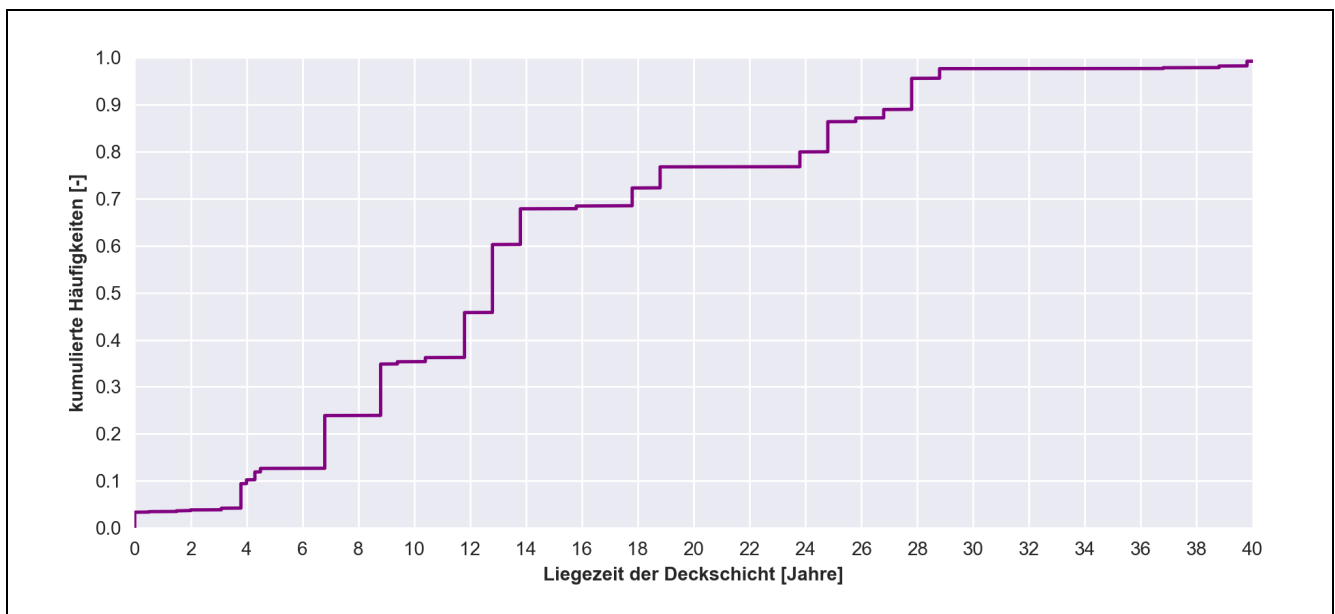


Abbildung 57: Kumulierte Häufigkeiten der Deckschichtliegezeiten der ZEB-Dauermessstrecke im Herbst 2015

---

Etwa 75 % des Streckenabschnittes weisen eine durchschnittliche Liegezeit der Deckschicht zwischen 0 und 18 Jahren auf. Es ist festzustellen, dass auf einigen Streckenabschnitten die in den Regelwerken (z. B. RPE-Stra 01) enthaltenen durchschnittlichen Nutzungsdauern der Deckschichten zum Teil deutlich überschritten werden.

#### **4.7 Klimadaten**

Um die klimatischen Einflüsse auf den Straßenzustand zukünftig untersuchen zu können, werden entlang der DMS zusätzlich Niederschlag- und Temperaturverlaufsdaten aufgezeichnet. Diese Daten sind jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

#### **4.8 Kapitelzusammenfassung**

In diesem Kapitel wurde die DMS sowie die damit verbundene Datengrundlage vorgestellt. Es wurden sowohl der Umfang als auch die Qualität der erhobenen Daten erläutert. Neben den alle vier Jahre durchgeführten ZEB, wird der Zustand der Fahrbahnoberfläche zusätzlich zweimal pro Jahr messtechnisch erfasst. Die sehr detaillierte Dokumentation von Maßnahmen der betrieblichen und baulichen Erhaltung stellt eines der Herausstellungsmerkmale dieser Beobachtungsstrecke dar. Des Weiteren werden Verkehrs-, Aufbau und Klimadaten in regelmäßigen Abständen erfasst. Die vorliegenden Daten dieser Beobachtungsstrecke erlauben die Untersuchung einer Vielzahl an Fragestellungen, von denen im Folgenden verschiedene Aspekte analysiert werden.

---

## 5 Voruntersuchungen und Simulation

---

### 5.1 Allgemeines

In Kapitel 3 wurde der Stand des Wissens zu methodischen probabilistischen Ansätzen zur Analyse und Prognose von Straßenzustandsdaten vorgestellt. Einen wesentlichen Einfluss auf die Validität der Prognoseergebnisse stellt die Qualität der bei der Modellierung verwendeten Datengrundlage dar. Mit der Einrichtung einer ZEB-Dauermessstrecke (DMS) wurde damit begonnen, die Voraussetzungen für eine einzigartige Datengrundlage zu schaffen, die für die Untersuchung einer Vielzahl an Fragestellungen innerhalb des Erhaltungsmanagements von Straßen herangezogen werden kann.

In diesem Kapitel wird die in Kapitel 3 skizzierte Problemstellung zum Umgang mit gemessenen Zustandsverbesserungen konkretisiert und zunächst anhand der empirischen Daten der DMS (vgl. Kapitel 4) untersucht.

Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Ursachen von gemessenen Zustandsverbesserungen zu analysieren, die Auswirkungen einer einseitigen Beschneidung der Daten zu veranschaulichen und darauf aufbauend eine Methodik zu entwickeln, die den Umgang mit unsicherheitsbehafteten Daten ermöglicht.

Aufbauend auf den Grundlagen der Statistik erfolgt im Rahmen einer Simulation eine systematische Untersuchung des Umfangs an gemessenen Zustandsverbesserungen. Im Anschluss daran wird eine Methodik vorgestellt, die eine Berücksichtigung von Messunsicherheiten und somit den Umgang mit gemessenen Zustandsverbesserungen innerhalb eines Modells ermöglicht. Die vorgestellte Methode wird anschließend auf die ZEB-Daten angewendet und die Ergebnisse diskutiert.

Die nachfolgenden Untersuchungen werden am Beispiel der Zustandsgröße mittlere Spurrinnentiefe (MSPT) exemplarisch durchgeführt. Zum einen findet die Ebenheit im Querprofil sowohl bei der Erstellung des Gebrauchs- als auch des Substanzwerts (Oberfläche) Berücksichtigung (vgl. Kapitel 2.6.2.5) und ist damit ein bedeutender Indikator zur Bewertung eines Straßennetzes. Zum anderen liegen mittlerweile zahlreiche Erkenntnisse zur Entwicklung von Spurrinnen aus empirischen und mechanistischen Untersuchungen vor, die eine verbesserte Nachvollziehbarkeit von (Zwischen-) Ergebnissen ermöglicht. Weiterhin handelt es sich bei der Spurrinnentiefe um eine physikalische, direkt messbare Größe. Eine zum Teil subjektive Beurteilung des Zustandes, wie z. B. bei der Erfassung des Oberflächenbildes (vgl. Kapitel 2.6.2.3), entfällt.

### 5.2 Problemstellung

Zustandsdynamiken basieren auf der Analyse von Zustandsänderungen eines Systems. Als Datengrundlage dienen oftmals die Ergebnisse der Zustandserfassung zweier Messkampagnen. Eine Gegenüberstellung der Zustände je Auswerteabschnitt pro Messzeitpunkt kann anhand der Differenz der beiden Zustände dargestellt werden. Je nach Ergebnis dieser Differenzen kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob sich der Zustand verschlechtert hat, ob er konstant geblieben ist oder ob er sich verbessert hat. Bei der Auswertung von sehr geringen Zustandsänderungen ergibt sich jedoch die Fragestellung, ob gemessene Zustandsdifferenzen zwischen zwei Messzeitpunkten aus tatsächlichen Änderungen des Zustandes oder aus der Präzision des Prüfverfahrens resultieren.

In der Abbildung 58 sind die absoluten Häufigkeiten an Zustandsänderungen für die Zustandsgröße mittlere Spurrinnentiefe innerhalb eines Zeitintervalls von vier Jahren (ZEB-Messkampagnen 2009/2013) dargestellt. Die Auswertung basiert auf insgesamt 42.146 hessischen 100-m-Auswerteabschnitten.

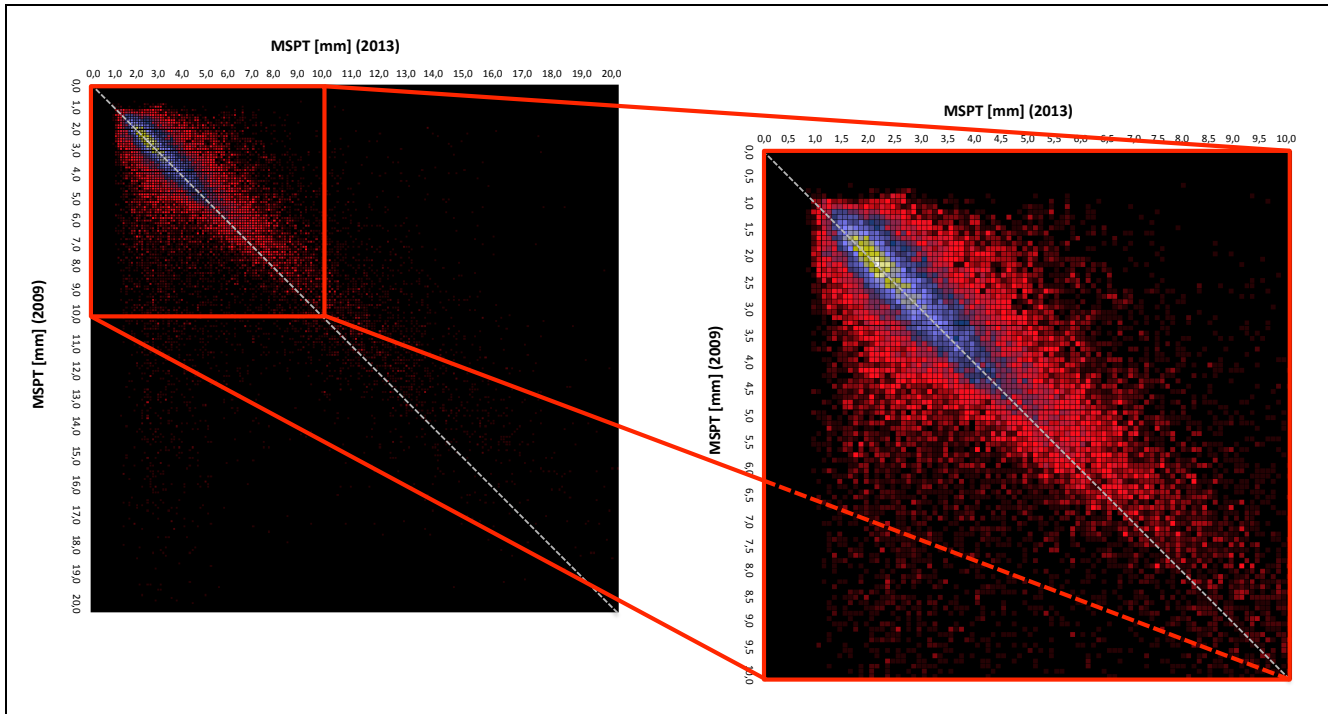


Abbildung 58: Absolute Übergangshäufigkeiten für die mittleren Spurrinnentiefen (MSPT) innerhalb von vier Jahren (links: MSPT bis 20 mm, rechts: Ausschnitt der MSPT bis 10 mm)

In der Abbildung 58 ist eine symmetrische Zuordnung der gemessenen Zustandsänderungen entlang der Matrixdiagonalen zu erkennen. Dies bedeutet, dass im Mittel keine Zustandsänderungen innerhalb des Netzes festzustellen sind. In den höheren Zustandsklassen ist eine geringe Verlagerung der gemessenen Zustandsänderungen hin zu Zustandsverschlechterungen zu erkennen. Des Weiteren ist ein vertikaler „Schweif“ in Höhe von gemessenen Spurrinnentiefen zwischen ca. 2,0 mm und 3,0 mm zu erkennen, welcher vermutlich durch zwischenzeitlich durchgeführte Erhaltungsmaßnahmen zu erklären ist. Auffällig ist weiterhin, dass bei beiden Messkampagnen keine Spurrinnentiefen kleiner als 1,0 mm gemessen wurden.

Wie in Kapitel 3 aufgezeigt, wurden insbesondere bei den bisher entwickelten auf Markov-Prozessen basierenden Prognosemodellen (vgl. z. B. Koch 1992; Hinsch et al. 2005; Wermuth 2012; Hess et al. 2013) stets sämtliche gemessenen Zustandsverbesserungen aus den Datensätzen eliminiert. Aufgrund der den Messergebnissen inne liegenden Messungenauigkeit sind die gemessenen Zustände jedoch aus statistischer Sicht fehlerbehaftet. Durch die einseitige Eliminierung von gemessenen Zustandsverbesserungen in den Datensätzen wird jedoch ein systematischer Fehler begangen, der zu einer verfälschten Ermittlung von Übergangshäufigkeiten und dadurch zu einer Überschätzung der Schädigungsraten führt. Auf diese Problemstellung wird in der Literatur bisher nur vereinzelt hingewiesen [Socina 2007; Weninger-Vycudil et al. 2009]. Eine geeignete Methodik zum Umgang mit diesen Daten liegt bisher nicht vor.

Im Folgenden wird anhand der Daten der DMS zunächst untersucht, inwieweit eine verbesserte Datenqualität zur Lösung der beschriebenen Problemstellung beitragen kann.

### 5.3 Untersuchung der empirischen Datengrundlage

#### 5.3.1 Allgemeines

Die beschriebene „Problematik des Zufalls“ wird anhand einer Gegenüberstellung der gemessenen Zustandsänderungen besonders deutlich, basierend auf verschobenen Zeitfenstern der Erfassungen. Die Abbildung 59 zeigt hierzu den Vergleich der gemessenen Zustandsänderungen zwischen den Messkampagnen des Frühjahres 2011 und 2015 sowie den Messkampagnen im Herbst 2011 und 2015.

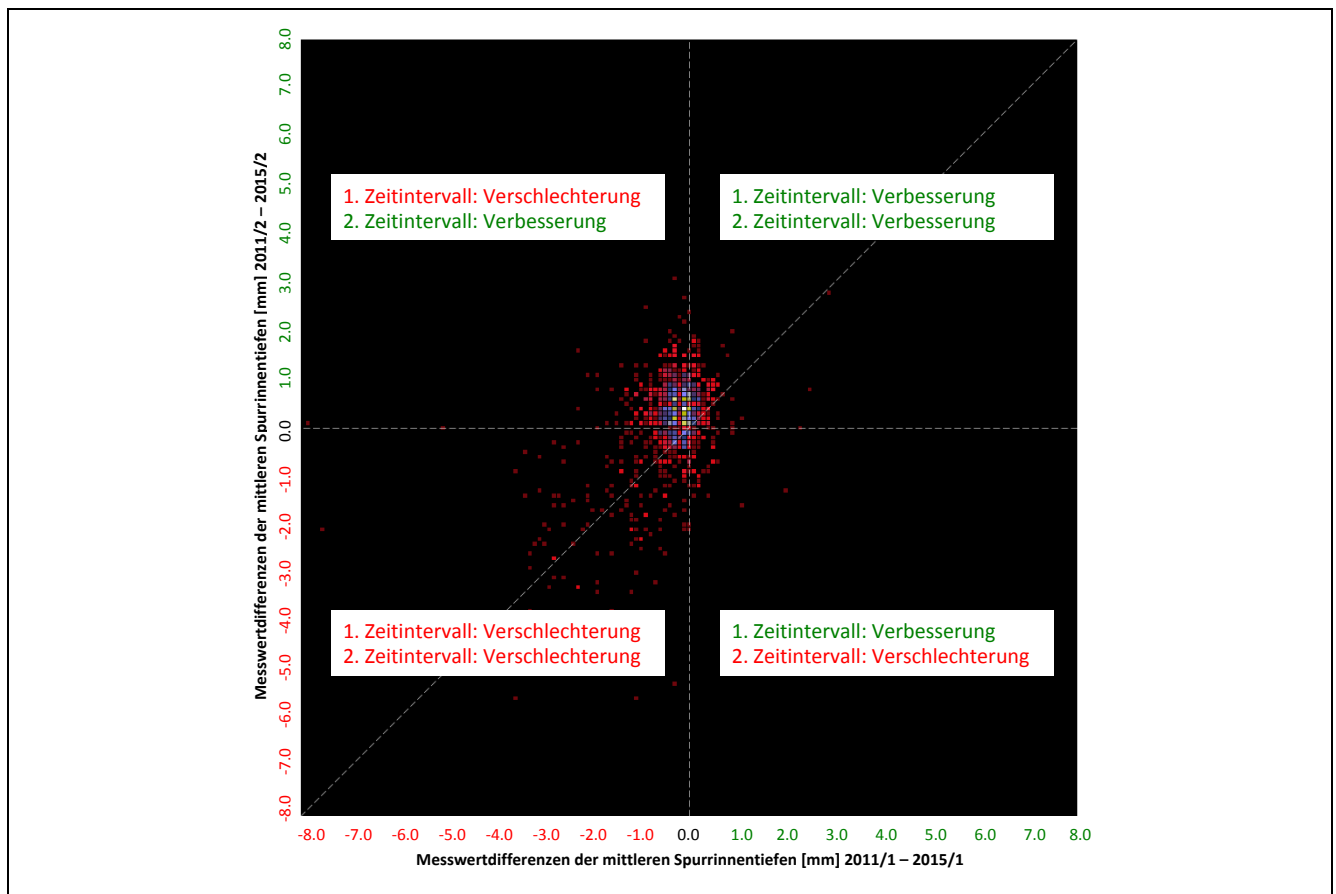


Abbildung 59: Vergleich der gemessenen Zustandsänderungen zwischen den Kampagnenvergleichen 2011/1–2015/1 und 2011/2 – 2015/2

Auf der Abszisse sind die gemessenen Zustandsänderungen der Frühjahrmessungen und auf der Ordinate die gemessenen Zustandsänderungen der im Herbst durchgeführten Erfassungen aufgetragen. Der Anteil an Auswerteabschnitten, bei denen in beiden Zeitintervallen eine Zustandsverschlechterung gemessen wurde, beträgt ca. 24 %. Der Anteil an Auswerteabschnitten, bei denen in beiden Zeitintervallen eine Zustandsverbesserung gemessen wurde, beträgt ca. 16 %. Bei insgesamt ca. 40 % aller Auswerteabschnitte wurde ein Wechsel zwischen einer gemessenen Zustandsverschlechterung und einer Zustandsverbesserung festgestellt, obgleich die hierfür verwendeten Messkampagnen lediglich um ein halbes Jahr verschoben sind. Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass die auf zwei Messkampagnen basierende Analyse von Zustandsänderungen ein weitestgehend zufälliges Ergebnis liefert. Die Ursachen hierzu sowie mögliche Lösungsansätze werden im Folgenden diskutiert.



### 5.3.2 Einfluss einer Feinsynchronisierung

In der Regel erfolgt die Zuordnung der ZEB-Daten auf das Straßennetz anhand von GPS-Daten. Während den Messfahrten wird die Position des Messfahrzeugs mit Hilfe eines GPS-Gerätes erfasst und den Messwerten zugeordnet. Durch die feinsynchronisierten Zustandsdaten der Messkampagnen Frühjahr 2011 bis Herbst 2015 konnten die jeweiligen Messstrecken bis auf eine relative Verschiebung in Längsrichtung zueinander von etwa einem Meter überlagert werden.

Für die Beurteilung des Nutzens einer Feinsynchronisierung von Zustandsdaten werden die absoluten Zustandsänderungen aller hessischen Bundesautobahnen, der nicht feinsynchronisierten Streckenbänder der DMS und der feinsynchronisierten Daten gegenübergestellt. Anhand eines Streudiagrammes sowie eines Histogramms aller gemessenen Zustandsänderungen wird der Nutzen der Feinsynchronisierung beurteilt.

#### 5.3.2.1 Analyse von 100-m-Auswerteabschnitten hessischer Bundesautobahnen

Die Auswertung von Zustandsänderungen von hessischen Bundesautobahnen basiert auf insgesamt 35.596 100-m-Auswerteabschnitten, die in den Jahren 2009 und 2013 im Rahmen der ZEB messtechnisch erfasst wurden. Die Abbildung 60 zeigt die gemessenen Zustandsänderungen der mittleren Spurrinnentiefe als Streudiagramm.

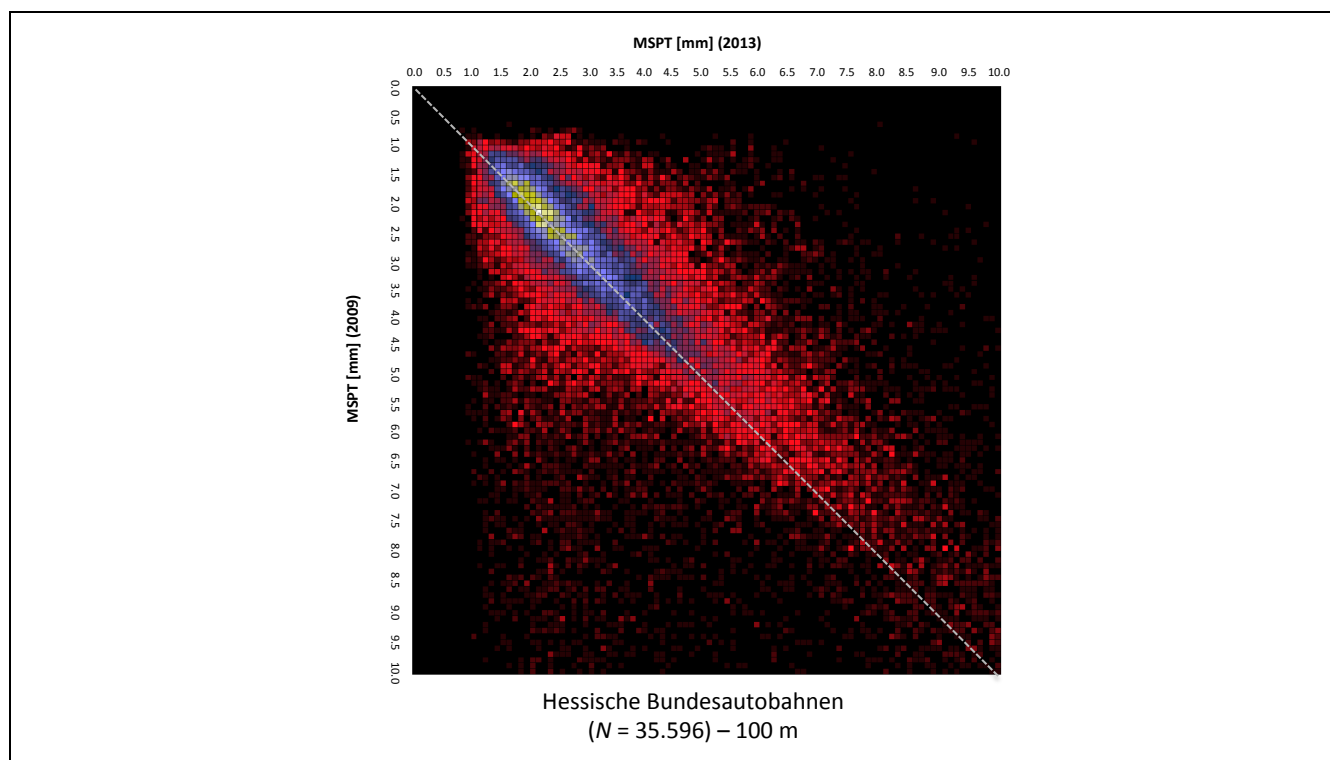


Abbildung 60: Absolute Anzahl an gemessenen Zustandsübergängen von 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT von hessischen Bundesautobahnen zwischen 2009 und 2013

Das abgebildete Streudiagramm zeigt, dass der größte Anteil aller Abschnitte eine mittlere Spurrinnentiefe zwischen 1,0 mm und 5,0 mm aufweist. Im Mittel ist ein konstanter Zustand über alle Auswerteabschnitte zu erkennen. Im linken unteren Bereich des Diagramms ist eine auffällige Häufung an Auswerteabschnitten zu sehen, die scheinbar eine deutliche Zustandsverbesserung innerhalb

des Betrachtungszeitraums von vier Jahren erfahren haben. Die Abbildung 61 zeigt die gemessenen Zustandsänderungen der mittleren Spurrinnentiefe als kumulierte Häufigkeiten aller 100-m-Auswerteabschnitte.

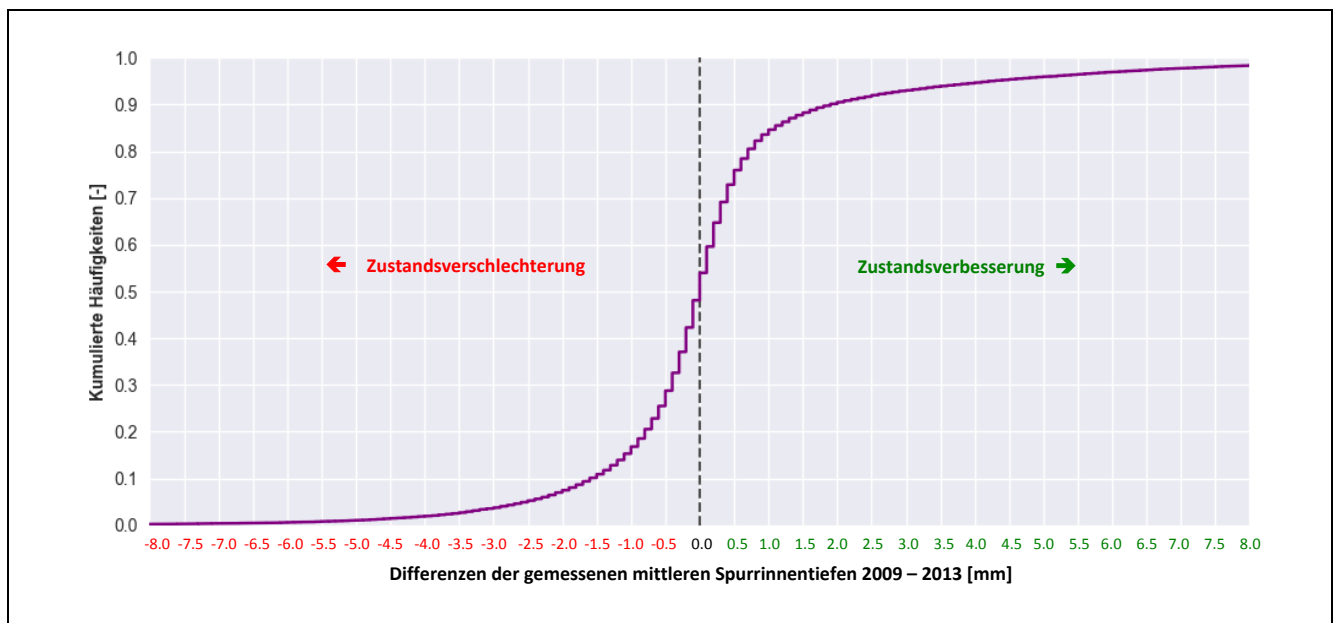


Abbildung 61: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen von 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT hessischer Bundesautobahnen zwischen 2009 und 2013

Aus der gezeigten Darstellung geht hervor, dass der Anteil an gemessenen Zustandsverschlechterungen und -verbesserungen mit etwa 48 % bzw. 45 % annähernd gleich ist. Der Anteil an Auswerteabschnitten, die keine Zustandsänderung aufweisen, liegt bei etwa 6 %. Im Mittel beträgt die Differenz der mittleren Spurrinnentiefen 0,2 mm mit einer Standardabweichung von 2,3 mm.

### 5.3.2.2 Analyse von nicht feinsynchronisierten 100-m-Auswerteabschnitten der DMS

Im Vergleich zu dem gesamten Hessischen Autobahnnetz (vgl. Abbildung 60), zeigt die Abbildung 62 nur die absolute Anzahl an gemessenen Zustandsänderungen von 100-m-Auswerteabschnitten für die Zustandsgröße MSPT auf der DMS zwischen dem Frühjahr 2011 und dem Frühjahr 2015. Es ist zu erkennen, dass der Großteil aller Auswerteabschnitte nur sehr geringe Zustandsänderungen zwischen -1,0 mm und +1,0 mm aufweist. Weiterhin wird deutlich, dass ein „perfekter“ Zustand mit einer mittleren Spurrinnentiefe von 0,0 mm in keinem der Auswerteabschnitte vorzufinden ist. Diese Tatsache verdeutlicht, dass dieser „ideal ebene“ Zustand vermutlich aus bautechnischen Randbedingungen nicht erreicht werden kann – eine ideal ebene Straße ist bisher nicht herstellbar.

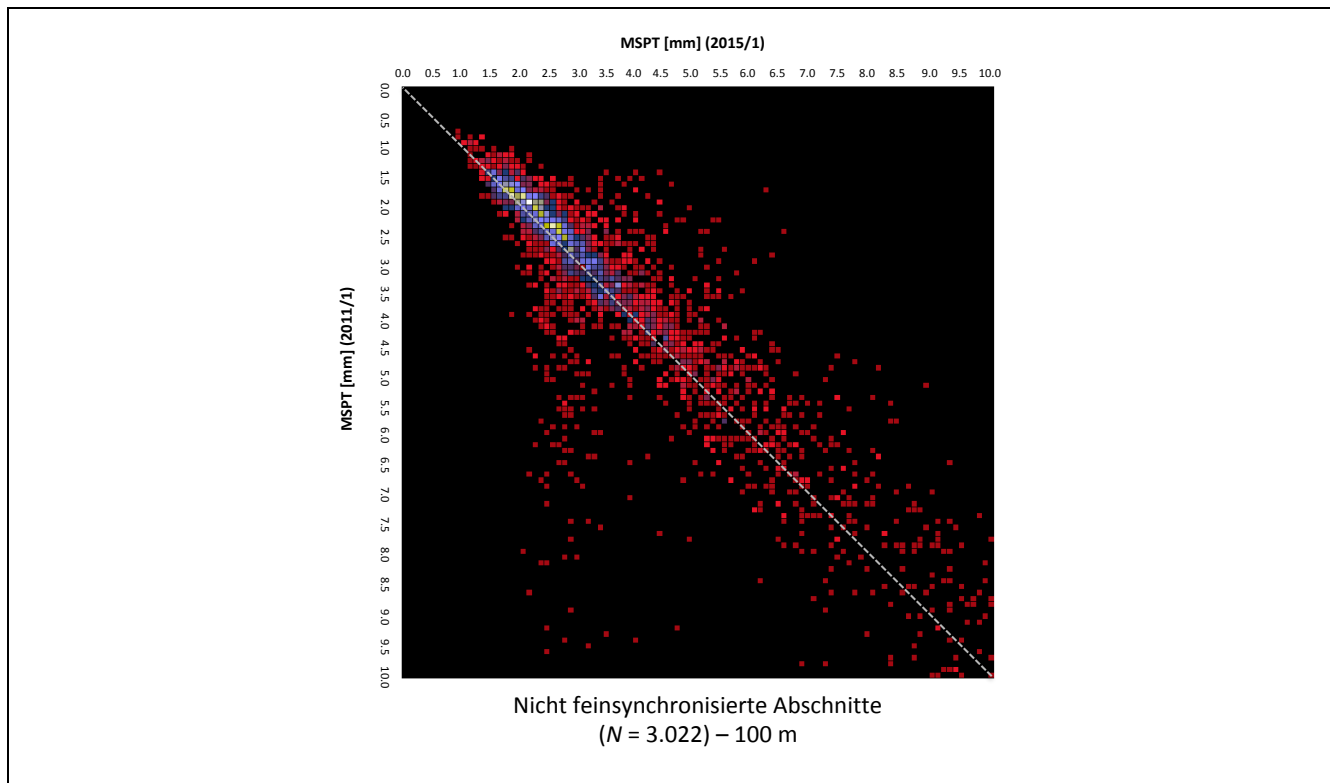


Abbildung 62: Absolute Anzahl an gemessenen Zustandsübergängen von nicht feinsynchronisierten 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015

Die entsprechende Häufigkeitsverteilung der Zustandsänderungen zwischen dem Frühjahr 2011 und dem Frühjahr 2015 ist in der Abbildung 63 dargestellt. Auf der Grundlage von insgesamt 3.022 ausgewerteten 100-m-Abschnitten liegt der Anteil der gemessenen Zustandsverschlechterungen bei 51 %. Einen geringeren, jedoch immer noch großen Anteil von ca. 38 % stellen die gemessenen Zustandsverbesserungen dar. Der Anteil an Auswerteabschnitten, die keinerlei Veränderung zwischen den beiden Messzeitpunkten aufweisen, liegt bei 10 %. Im Mittel beträgt die Differenz der mittleren Spurrinntiefen 0,0 mm mit einer Standardabweichung von 1,7 mm.

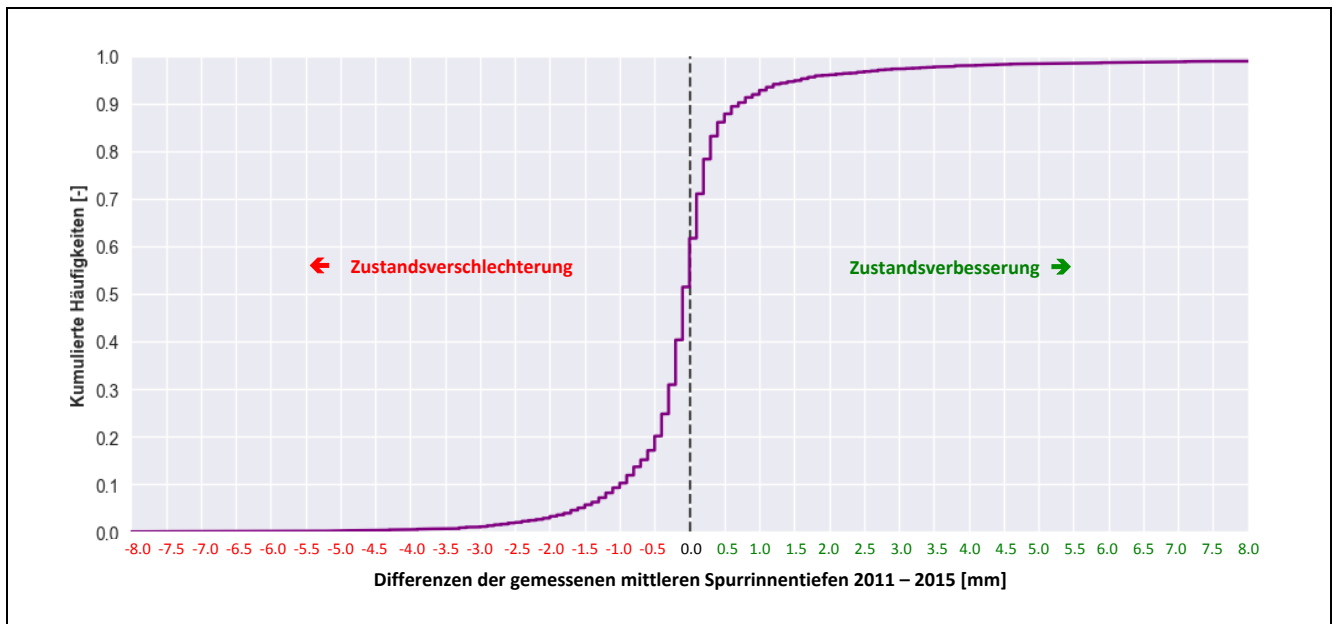


Abbildung 63: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen von nicht feinsynchronisierten 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015

### 5.3.2.3 Analyse von feinsynchronisierten 100-m-Auswerteabschnitten der DMS

Im Hinblick auf die Beurteilung des Nutzens einer Feinsynchronisierung von Zustandsdaten ist die Abbildung 64 zu betrachten. Darin sind die gemessenen Zustandsänderungen der feinsynchronisierten 100-m-Auswerteabschnitte abgebildet. Das Diagramm basiert auf einer Gesamtanzahl von 2.912 Auswerteabschnitten. Es ist zu erkennen, dass der Streubereich um die Matrixdiagonale im Vergleich zu den nicht feinsynchronisierten Zustandsdaten schmaler ausfällt.

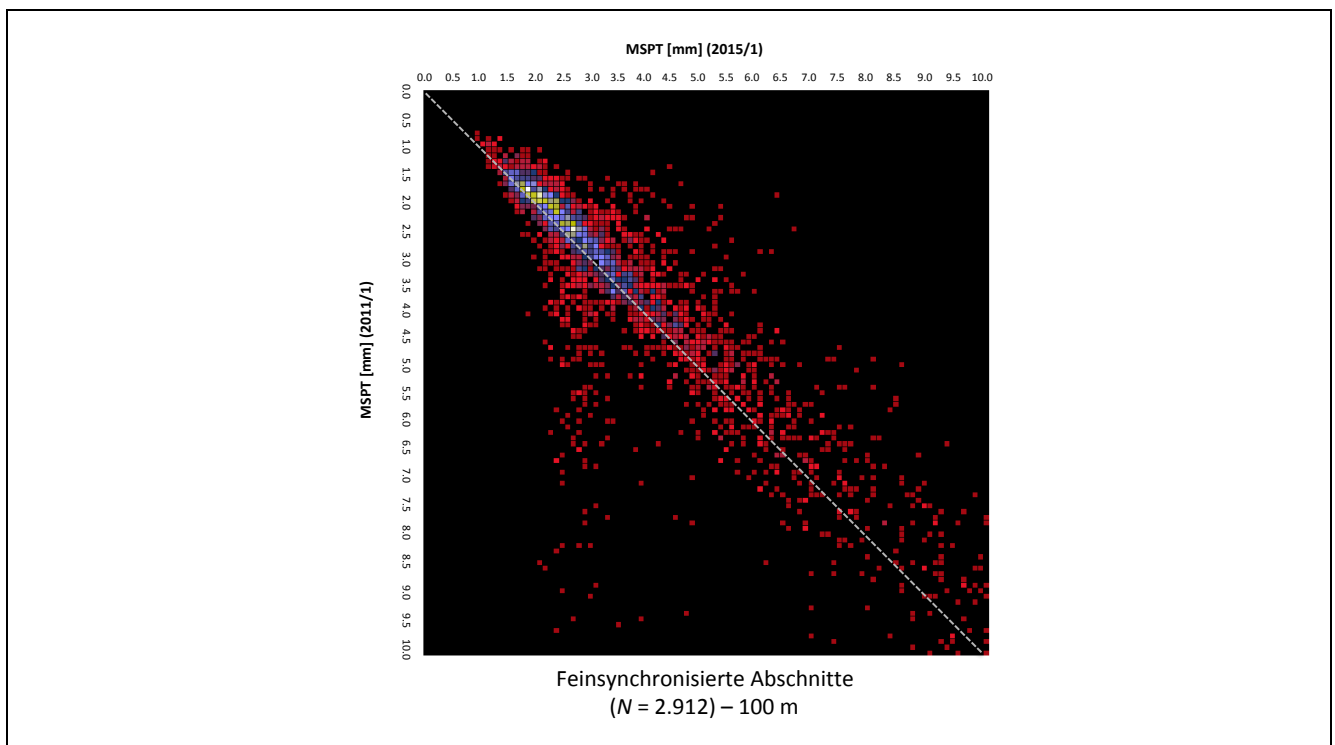


Abbildung 64: Absolute Anzahl an gemessenen Zustandsübergängen von feinsynchronisierten 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015

Eine Analyse der kumulierten Häufigkeiten liefert einen Anteil an gemessenen Zustandsverschlechterungen von etwa 52 %. Der Anteil an gemessenen Zustandsverbesserungen konnte nur minimal auf 37 % verringert werden. Der Anteil an Auswerteabschnitten mit keinerlei Zustandsänderung liegt bei knapp 11 % (vgl. Abbildung 65). Im Mittel beträgt die Differenz der mittleren Spurrinntiefen 0,0 mm mit einer Standardabweichung von 1,7 mm.

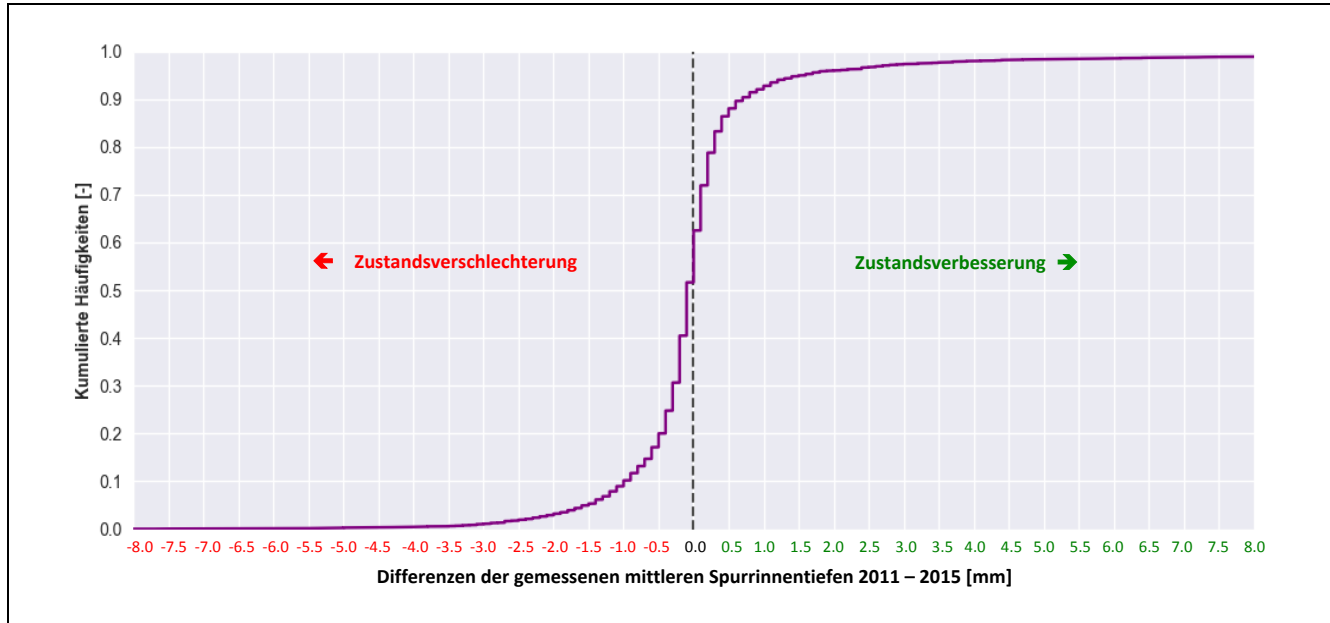


Abbildung 65: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen von feinsynchronisierten 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011/1 und 2015/1

### 5.3.3 Einfluss der Auswerteabschnittslänge

Eine immer wieder kontrovers diskutierte Fragestellung, insbesondere im Hinblick auf die Maßnahmenplanung, ist die Wahl der Länge der Auswerteabschnitte. Derzeit liegt die für Außerortsstraßen festgelegte Länge eines Auswerteabschnitts bei 100 m. Für Bundesstraßen innerorts beträgt die Länge eines Auswerteabschnitts 20 m [ZTV ZEB-StB 2006]. Eine größere Länge von Auswerteabschnitten ist zwar weniger empfindlich auf einzelne Ausreißer und erleichtert die anschließende Aggregation zu Erhaltungsabschnitten. Eine feinere Untergliederung der Auswerteabschnitte ermöglicht hingegen eine bessere Lokalisierung von einzelnen Schadstellen, führt jedoch auch zu höheren Streuungen innerhalb eines Auswerteabschnittes.

Für die Analyse des Einflusses der Länge der Auswerteabschnitte konnten die auf dem IT-ZEB-Server vorhandenen Ergebnisdateien der ZEB nicht verwendet werden, da diese Auswerteabschnitte mit einer Länge von jeweils 100 m beinhalten. Stattdessen wurden die Netz-Grunddaten mit einer nutzerspezifischen leeren ERG-Tabelle und den xml-Dateien der Messungen mit Hilfe der Softwaretools TP0-Check und GeoRohRaster verschnitten. Anschließend wurde die nutzerspezifische ERG-Tabelle mit den Rasterrohdaten mit Hilfe des Softwaretools RohZGZW gefüllt, sodass als Ergebnis eine Ergebnistabelle mit 10-m-Auswerteabschnitten zur Auswertung vorlag (vgl. Anhang A2).

Die Abbildung 66 zeigt das Streudiagramm der feinsynchronisierten 10-m-Auswerteabschnitte, welches auf der Basis von insgesamt 30.797 Auswerteabschnitten erstellt wurde. Aufgrund der etwa 10-mal so großen Anzahl an Auswerteabschnitten ist die charakteristische Form der gemessenen Zustandsänderungen entlang der Matrixdiagonalen nun deutlicher zu erkennen. Jedoch streuen die auf 10-m-Auswerteabschnitte bezogenen Mittelwerte aufgrund der geringeren Auswertelänge deutlich mehr im Vergleich zu den Werten der 100-m-Auswerteabschnitten.

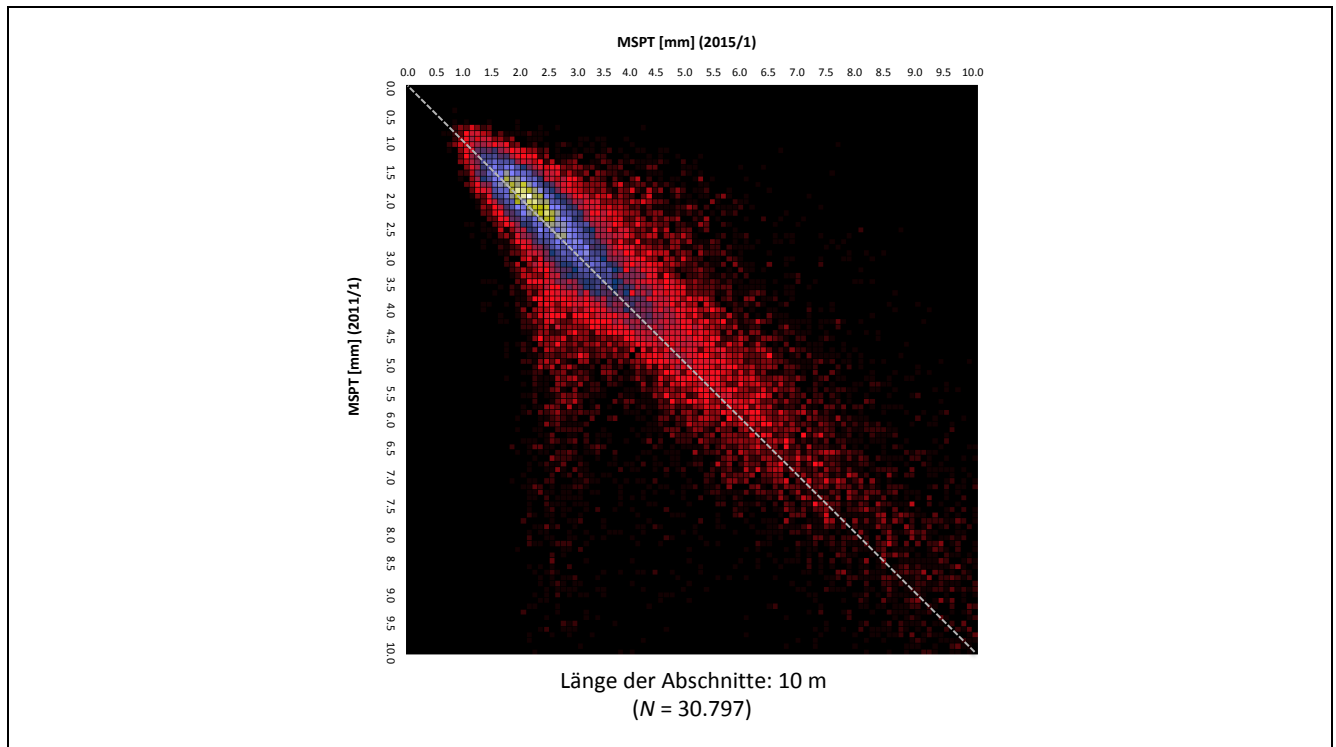


Abbildung 66: Absolute Anzahl an gemessenen Zustandsübergängen von feinsynchronisierten 10-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015

Die Auswertung der kumulierten Häufigkeiten in Abbildung 67 zeigt, dass der Anteil an gemessenen Zustandsverschlechterungen bei etwa 51 % liegt. Der Anteil an gemessenen Zustandsverbesserungen beträgt ca. 41 %. Insgesamt weisen etwa 8 % aller 10-m-Auswerteabschnitte keine Zustandsänderung auf. Im Mittel beträgt die Differenz der mittleren Spurrinntiefen 0,0 mm mit einer Standardabweichung von 1,9 mm.

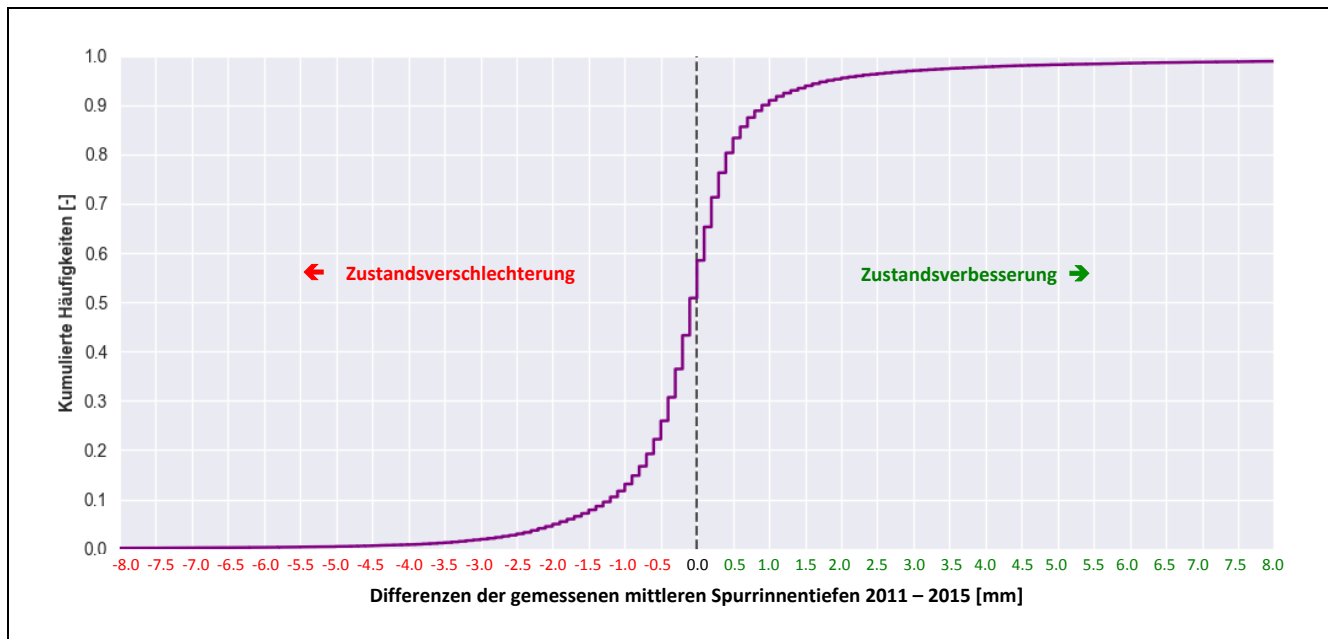


Abbildung 67: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen von feinsynchronisierten 10-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015

### 5.3.4 Einfluss von Erhaltungsmaßnahmen

Eine weitere Möglichkeit der verwendeten Methode besteht in der probabilistischen Abbildung der Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen. Analog zur Beschreibung der Zustandsverschlechterung von Straßen können ebenso die durch Erhaltungsmaßnahmen erreichten Zustandsverbesserungen inklusive ihrer Streuungen dargestellt werden. In den zuvor durchgeführten Auswertungen wurde vermutet, dass der im unteren linken Matrixteil dargestellte Streifen an gemessenen Zustandsverbesserungen vorrangig aus zwischenzeitlich durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen resultiert. Eine empirische Überprüfung dieser Vermutung konnte bisher meist aufgrund einer unzureichenden Dokumentation dieser Maßnahmen nicht erfolgen. Die hohe Qualität der dokumentierten Daten zu durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen auf der DMS ermöglicht es, diese Hypothese anhand der Daten nun zu überprüfen.

Für die Untersuchungen wurden die durch Hessen Mobil dokumentierten Erhaltungsmaßnahmen anhand der Informationen zu den betroffenen Netzknoten, der Stationierung, der Fahrstreifennummer und den Betriebskilometern mit den Zustandsdaten der ZEB verschnitten. Alle 100-m-Auswerteabschnitte, zu denen eine bauliche oder betriebliche Erhaltungsmaßnahme zugeordnet werden konnte, wurden als Erhaltungsabschnitt in den Daten markiert. Hierzu erfolgte zunächst eine Zuordnung der anhand der Betriebskilometer lokalisierten Erhaltungsmaßnahmen zu den Auswerteabschnitten aus der Ergebnistabelle der ZEB. Anschließend wurden die Daten nach Auswerteabschnitten mit und ohne Erhaltungsmaßnahmen kategorisiert. Für jede Teilmenge wurde eine Übergangsmatrix erstellt sowie die absoluten Häufigkeiten an gemessenen Zustandsänderungen dokumentiert.

Die Abbildung 68 zeigt die beiden erstellten Übergangsmatrizen für die Auswerteabschnitte ohne (links) und mit (rechts) Erhaltungsmaßnahmen für den Zeitraum zwischen Frühjahr 2011 und Frühjahr 2015. Von den 2.912 Auswerteabschnitten wurden 1.509 Auswerteabschnitte identifiziert, in denen eine Erhaltungsmaßnahme dokumentiert wurde. Es ist zu erkennen, dass der zuvor vermutete

Zusammenhang zwischen den im linken unteren Bereich des Diagramms enthaltenen Auswerteabschnitten mit einer deutlichen Zustandsverbesserung und den durchgeführten Maßnahmen der betrieblichen und baulichen Erhaltung bestätigt werden kann. Wie in dem rechten Diagramm der Abbildung 68 ersichtlich, liegt ein Teil der von Maßnahmen betroffenen Auswerteabschnitte entlang der Matrixdiagonalen. Es sind allerdings weiterhin zahlreiche Auswerteabschnitte wiederzufinden, die nach einer deutlichen Zustandsverbesserung eine mittlere Spurrinnentiefe im Bereich von etwa 2,0 mm bis 3,0 mm aufweisen.

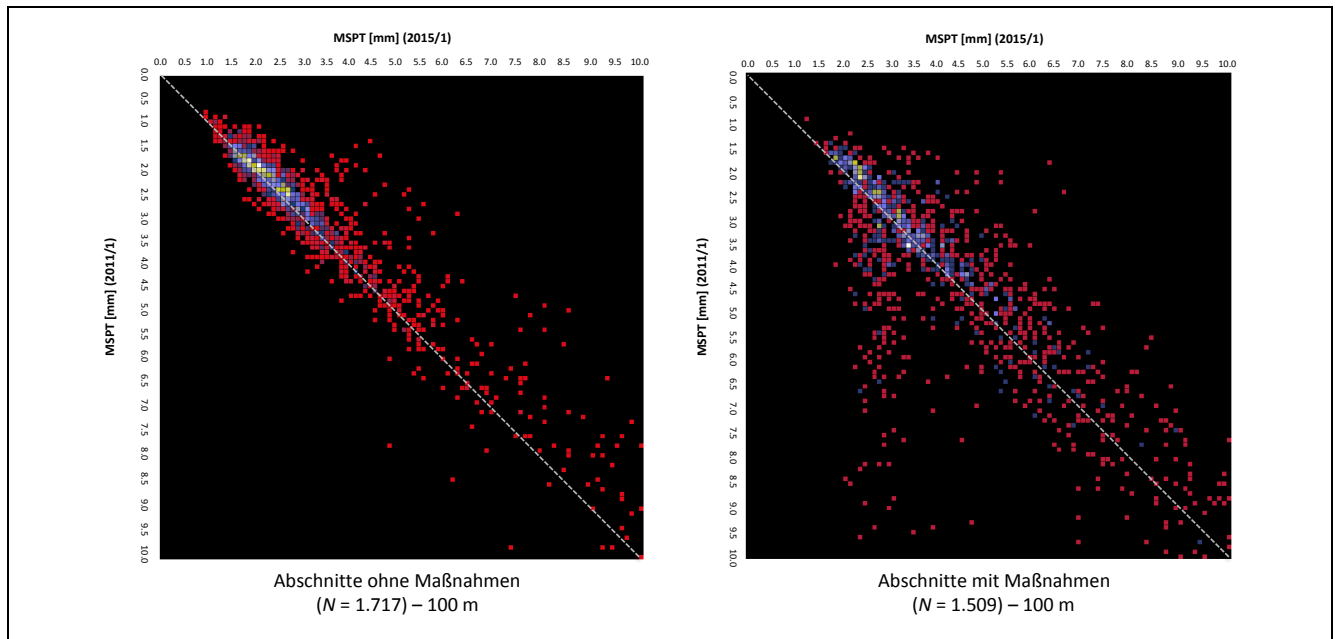


Abbildung 68: Absolute Anzahl an gemessenen Zustandsübergängen von 100-m-Auswerteabschnitten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015 (ohne Maßnahmen links, nur Maßnahmen rechts)

In der Abbildung 69 sind die gemessenen Zustandsänderungen für alle Auswerteabschnitte ohne dokumentierte Erhaltungsmaßnahmen als Histogramm dargestellt. Der zuvor ausgeprägte Bereich an gemessenen Zustandsverbesserungen im unteren linken Bereich der Übergangsmatrix ist in den um die Erhaltungsmaßnahmen gefilterten Auswerteabschnitte deutlich verringert. Demnach kann anhand der Daten bestätigt werden, dass diese gemessenen Zustandsverbesserungen vorrangig durch Erhaltungsmaßnahmen bedingt sind. Der Anteil an gemessenen Zustandsverbesserungen konnte nach Filterung der Daten auf etwa 34 % verringert werden. Des Weiteren beträgt der Anteil an Auswerteabschnitten mit einer gemessenen Zustandsverbesserung von mehr als 1,0 mm weniger als 1 %. Der Anteil an Auswerteabschnitten mit einer gemessenen Zustandsverschlechterung beträgt in etwa 52 %. Bei etwa 14 % der Auswerteabschnitte ohne Erhaltungsmaßnahmen konnte keine Zustandsänderung festgestellt werden.



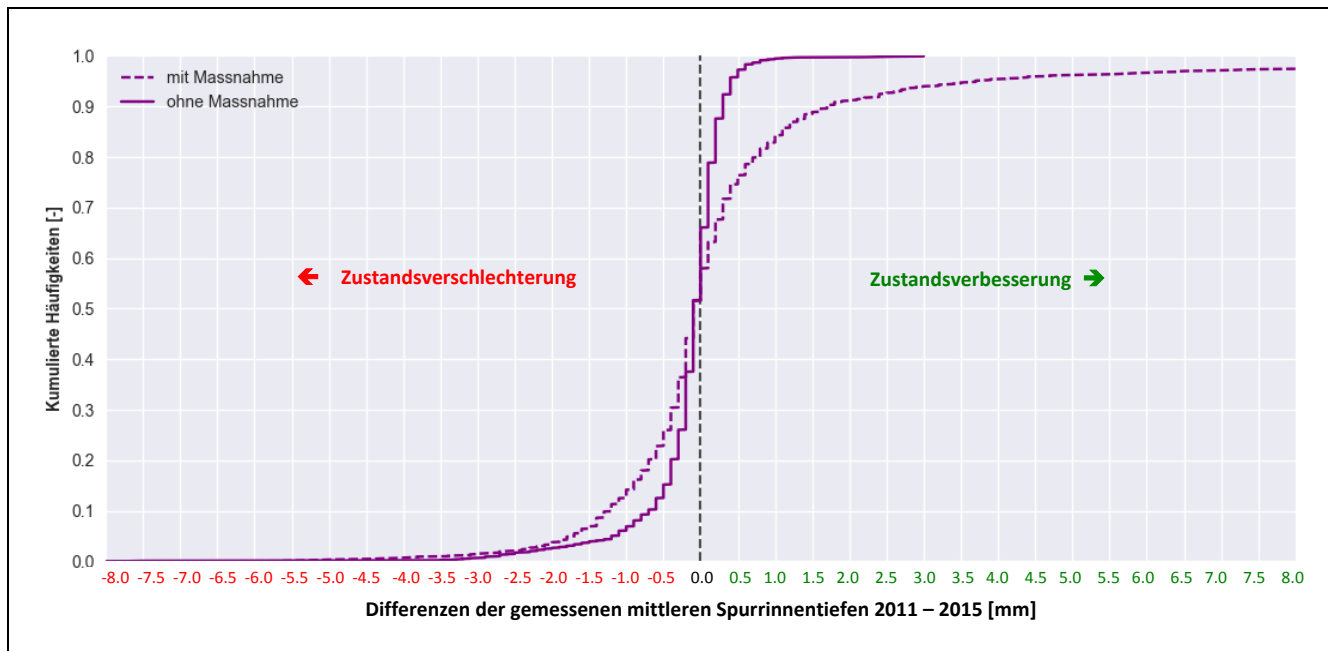


Abbildung 69: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen von feinsynchronisierten 100-m-Auswerteabschnittswerten für die Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen 2011 und 2015 mit und ohne durchgeführte Erhaltungsmaßnahmen

Bei den Auswerteabschnitten ohne Erhaltungsmaßnahmen beträgt die Differenz der mittleren Spurrinntiefen 0,0 mm mit einer Standardabweichung von 0,5 mm. Im Vergleich dazu ist bei den Auswerteabschnitten mit zwischenzeitlich durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen eine mittlere Differenz der gemessenen Spurrinntiefen von 0,2 mm mit einer deutlich größeren Standardabweichung von 2,4 mm festzustellen.

### 5.3.5 Einfluss der Verkehrsbelastung

Die Verkehrsbelastung ist eine wesentliche Einflussgröße, die die Zustandsentwicklung einer Straße beeinflusst. Es wird vermutet, dass mit zunehmender Verkehrsbelastung eine wachsende Zunahme der mittleren Spurrinntiefe erkennbar ist. Die Auswertungen wurden daher um den Einfluss der Verkehrsbelastung erweitert. Dazu wurden die empirischen kumulierten Häufigkeiten der gemessenen Zustandsänderungen je Fahrstreifen ausgewertet und grafisch aufbereitet. Die Analyse der gemessenen Zustandsänderungen getrennt nach Fahrstreifen zeigt, dass der Einfluss der Verkehrsbelastung auf Basis der erfassten Daten deutlich erkennbar ist. In der Abbildung 70 sind die gemessenen Zustandsänderungen der mittleren Spurrinntiefe je Fahrstreifen zwischen dem Frühjahr 2011 und dem Frühjahr 2015 dargestellt. Die Streudiagramme zeigen, dass die Streuung der Zustandsänderungen für den Hauptfahrstreifen (FS 1) sowie der Anteil an Zustandsverschlechterungen im Vergleich zu den beiden Überholfahrstreifen deutlich höher liegen.

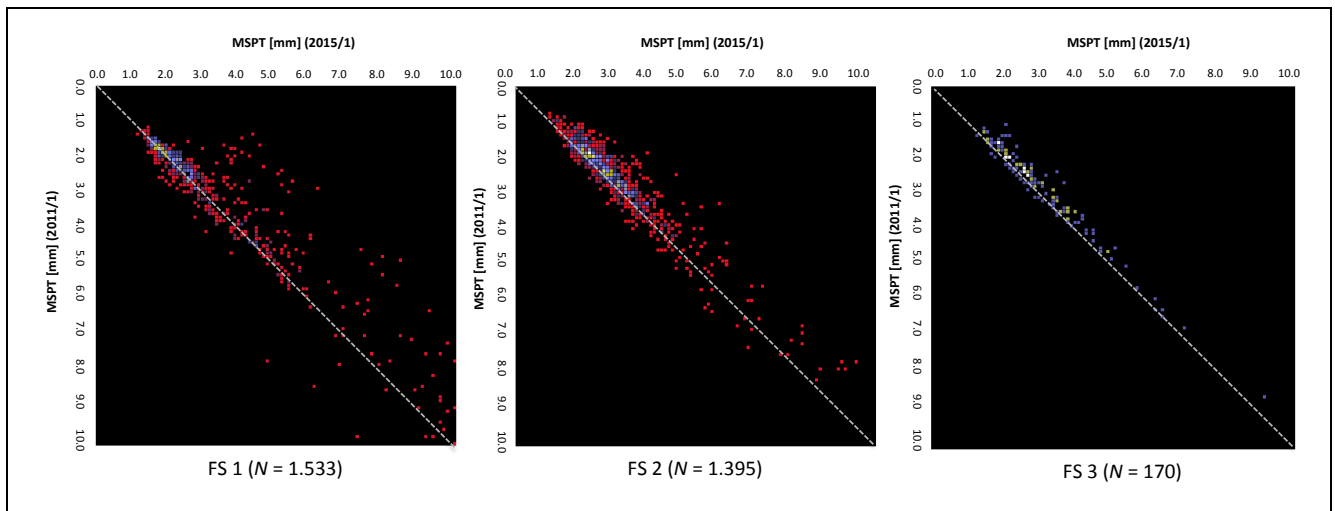


Abbildung 70: Gemessene Zustandsänderungen der Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke nach Fahrstreifennummer zwischen dem Frühjahr 2011 und dem Frühjahr 2015

In der Abbildung 71 sind die kumulierten Häufigkeiten der um Maßnahmen bereinigten gemessenen Zustandsänderungen je Fahrstreifen für die Zustandsgröße MSPT dargestellt. Im Mittel liegt die Zustandsänderung für den Hauptfahrstreifen bei einer Zustandsverschlechterung von 0,3 mm und einer Standardabweichung von 1,0 mm. Der erste Überholfahrstreifen (FS 2) weist im Mittel eine Zustandsverschlechterung von 0,1 mm auf und streut mit einer deutlich geringeren Standardabweichung von 0,4 mm. Der zweite Überholfahrstreifen (FS 3) zeigt eine mittlere Zustandsverschlechterung von 0,1 mm mit einer zugehörigen Standardabweichung von 0,2 mm.

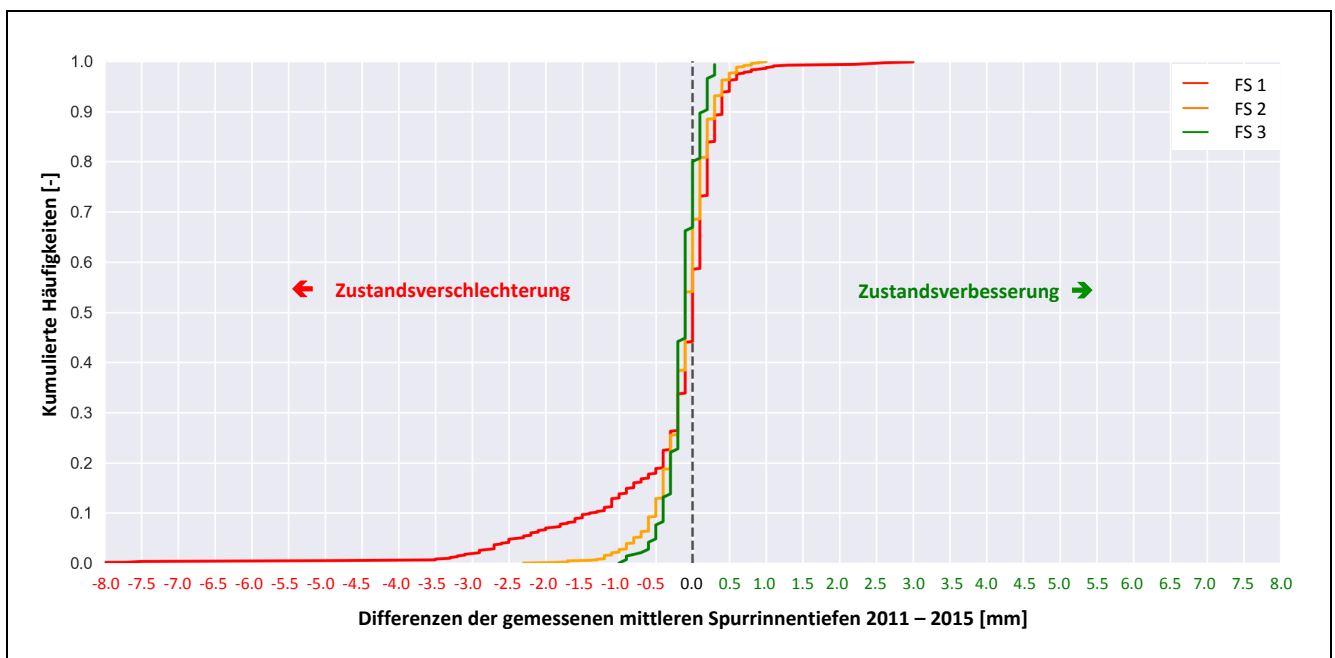


Abbildung 71: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen der Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen dem Frühjahr 2011 und dem Frühjahr 2015 je Fahrstreifen

### 5.3.6 Einfluss der Bauweise

Je nach Bauweise der Auswerteabschnitte (Asphalt/Beton) werden im Rahmen der ZEB teilweise bauweisespezifische Zustandsmerkmale erfasst und bewertet. Die betrachtete Zustandsgröße MSPT wird sowohl auf Fahrbahnoberflächen in Asphalt- als auch in Betonbauweise erfasst, wobei bei letzteren Fahrbahnen sowohl eine deutlich geringere Ausprägung in der mittleren Spurrinnentiefe als auch bei deren Zustandsänderung zu erwarten ist. Dies liegt darin begründet, dass bei Auswerteabschnitten in Betonbauweise die Entstehung bzw. Entwicklung von Spurrinnen, wenn überhaupt, durch geringen Verschleiß hervorgerufen werden. Eine Nachverdichtung des Materials durch den Verkehr ist im Allgemeinen nur bei Auswerteabschnitten in Asphaltbauweise zu beobachten.

Für die Untersuchung des Einflusses der Bauweise wurden die gemessenen Zustandsänderungen daher getrennt nach Asphalt- und Betonbauweise ausgewertet und deren Ergebnisse grafisch aufbereitet.

In der Abbildung 72 sind die gemessenen Zustandsänderungen der Zustandsgröße MSPT getrennt nach Asphalt- und Betonbauweise dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Streuung der Zustandsänderungen bei Auswerteabschnitten in Asphaltbauweise deutlich ausgeprägter ist. Dem gegenüber sind fast vollständig alle Auswerteabschnitte in Betonbauweise gleichmäßig entlang der Matrixdiagonalen wiederzufinden, sodass keine Zustandsänderungen zu erkennen sind. Die zufälligen Abweichungen der Messwerte entlang der Matrixdiagonalen sind vermutlich der Präzision des Prüfverfahrens zuzuordnen.

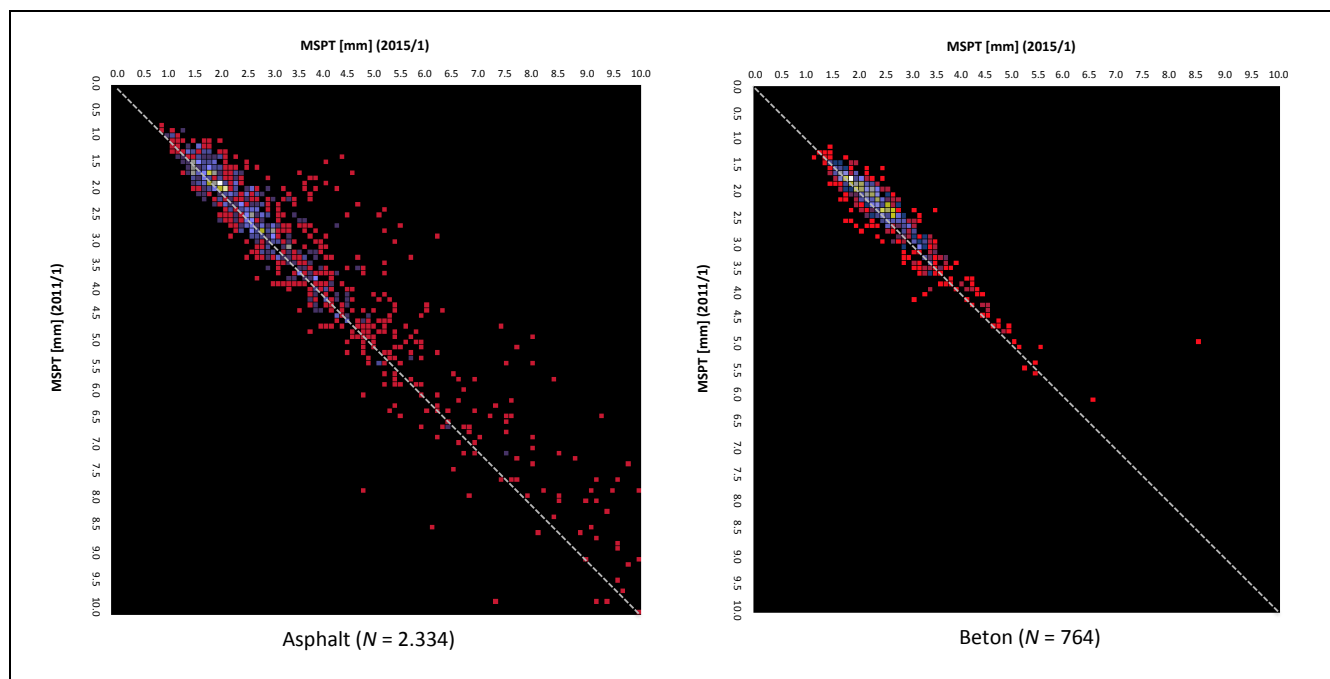


Abbildung 72: Gemessene Zustandsänderungen der Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke nach Asphalt (links)- und Betonbauweise (rechts)

Ein entsprechender Vergleich der kumulierten Häufigkeiten der gemessenen Zustandsänderungen ist in der Abbildung 73 dargestellt.

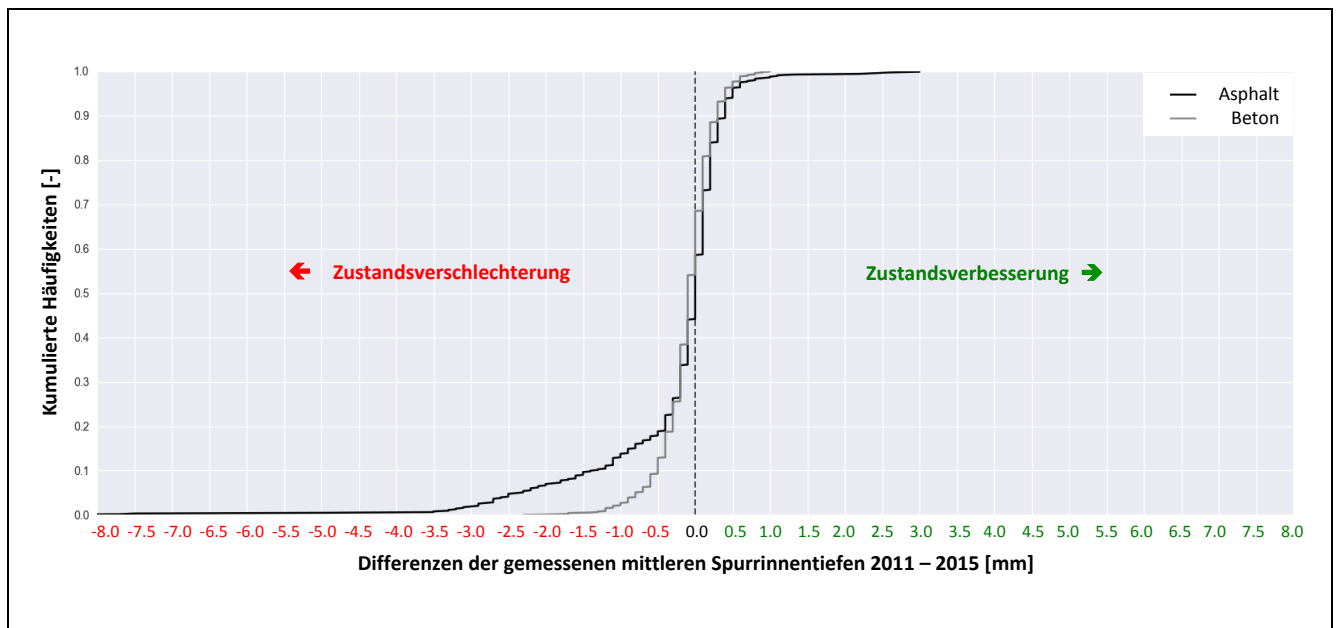


Abbildung 73: Kumulierte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zustandsänderungen der Zustandsgröße MSPT der ZEB-Dauermessstrecke zwischen dem Frühjahr 2011 und dem Frühjahr 2015 für Auswerteabschnitte in Asphalt- und Betonbauweise

Im Bereich der gemessenen Zustandsverbesserungen weisen die beiden Summenlinien einen vergleichbaren Verlauf auf, sodass hierbei zunächst keine Differenzierung bezüglich der Bauweise erkennbar ist. Die auf den Auswerteabschnitten in Asphaltbauweise gemessene Zustandsänderung variiert zwischen einer Zustandsverschlechterung von 3,5 mm und einer gemessenen Zustandsverbesserung von 3,0 mm. Die mittlere gemessene Zustandsänderung für Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise beträgt 0,0 mm mit einer Standardabweichung von 1,0 mm.

Bei den Auswerteabschnitten in Betonbauweise entspricht der Anteil an gemessenen Zustandsverschlechterungen in etwa dem Anteil an gemessenen Zustandsverbesserungen. Im Mittel weisen diese Auswerteabschnitte eine Zustandsverschlechterung von 0,2 mm mit einer Standardabweichung von 0,4 mm auf.

---

### 5.3.7 Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen auf Basis der Daten der ZEB-Dauermessstrecke können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der Anteil an gemessenen Zustandsverbesserungen innerhalb eines Zeitraums von vier Jahren betrug für die Zustandsgröße MSPT 38 %. Im Vergleich zu netzweit routinemäßig durchgeführten Erfassungen ist dies eine geringe Reduzierung (vgl. z. B. hessisches Bundesautobahnnetz mit 46 %).
- Durch eine Feinsynchronisierung der Zustandsdaten konnte der Anteil an gemessenen Zustandsverbesserungen jedoch lediglich auf 37 % verringert werden.
- Eine Auswertung der Zustandsänderungen von feinsynchronisierten 10-m-Auswerteabschnitten zeigte ein ähnliches Streubild mit einer etwas höheren Standardabweichung wie bei den 100-m-Auswerteabschnitten.
- Der womöglich größte Wissenszuwachs durch die erfassten Daten der DMS ist durch eine sehr detaillierte Dokumentation von durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen in diesem Streckenabschnitt gegeben, die in den gemessenen Zustandsänderungen deutlich wiederzufinden ist. Nach einer Bereinigung der Zustandsdaten um Auswerteabschnitte, in denen zwischenzeitlich Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt wurden, betrug der Anteil an gemessenen Zustandsverbesserungen 34 %. Der Anteil an gemessenen Zustandsverbesserungen  $> 1,0$  mm konnte jedoch hierdurch deutlich auf unter 0,5 % reduziert werden. Der Anteil an gemessenen Zustandsverbesserungen zwischen 0,0 mm und 1,0 mm ist folglich hauptsächlich der Präzision des Messverfahrens geschuldet.
- Der Einfluss des Schwerverkehrs ist anhand der Auswertung der Zustandsverteilungen je Fahrstreifen eindeutig erkennbar. Die entsprechende Auswertung der gemessenen Zustandsänderungen der Querebenheit zeigte auf dem Hauptfahrstreifen eine deutlich größere Spurrinnentiefe im Vergleich zu den weniger belasteten Überholfahrstreifen.
- Eine Differenzierung der Auswerteabschnitte nach Asphalt- und Betonbauweise bestätigte die Annahme, dass bei Auswerteabschnitten in Betonbauweise Differenzen der gemessenen Spurrinnentiefen zum Großteil auf Messungenauigkeiten der Erfassungssysteme zurückzuführen sind. Im Mittel weisen diese Auswerteabschnitte eine Zustandsverschlechterung von 0,2 mm mit einer Standardabweichung von 0,4 mm auf. Im Vergleich dazu ist bei Auswerteabschnitten in Asphaltbauweise eine mittlere gemessene Zustandsänderung von 0,0 mm mit einer Standardabweichung von 1,0 mm zu beobachten.

Die hier angewendete Auswertemethode verdeutlicht, dass ein bedeutender Anteil der gemessenen Zustandsänderungen auf die dem Prüfverfahren inne liegende Messunsicherheit und nicht, wie zunächst vermutet, auf eine ungenaue Feinsynchronisierung der Streckenbänder in Längsrichtung zurückzuführen ist. Dadurch ist eine Differenzierung zwischen tatsächlich vorhandenen Zustandsänderungen und aufgrund der Messpräzision der Prüfverfahren gemessenen Zustandsänderungen nicht möglich. Für die Bewertung des aktuellen Zustandes ist dieses Maß an Unschärfe unerheblich; für eine Prognose der Zustandsentwicklung einzelner Auswerteabschnitte jedoch entscheidend.

Im Folgenden wird überprüft, inwieweit hierfür ein geeignetes statistisches Modell entwickelt und angewendet werden kann, um die anhand der deskriptiven Statistik vermuteten Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Zustandsänderungen zu überprüfen sowie eine präzisere Abschätzung der Zustandsentwicklung zu ermöglichen.

## 5.4 Statistische Grundlagen

Die Summe aller erfassten Prüfergebnisse liefert Informationen über eine zu beurteilende Grundgesamtheit. Bei der Auswertung von Daten ist stets zwischen den wahren und den gemessenen Werten einer Prüfgröße zu unterscheiden. Jeder Einheit eines Prüfmerkmals (z. B. gemessene Zustandsgröße einer Straßenoberfläche) ist ein wahrer Wert zugeordnet, der aufgrund der beim Messprozess wirkenden zufälligen Störgrößen nicht direkt beobachtbar ist. Als Mess- bzw. Prüffehler wird die Abweichung des gemessenen vom wahren Wert bezeichnet.

Systematische Abweichungen werden weitestgehend durch die Durchführung von Qualitätsprüfungen ausgeschlossen. Dazu wurde ein Qualitätsmanagement für die Daten der Straßenzustandserfassung [ZTV ZEB-StB 2006] erarbeitet, welches seit Jahren eingeführt und umgesetzt wird (vgl. Kapitel 2.6.2). Zufällige Abweichungen sind hingegen durch die Kombination zahlreicher Einflussgrößen bestimmt, welche während einer Messung nicht kontrollierbar sind.

Da die bei einer Messung an einer Einheit konkret auftretende Prüffehlerabweichung quantitativ nicht beobachtbar ist, ist es nicht möglich, den wahren Wert einer Einheit exakt zu bestimmen, sondern lediglich mit Hilfe von möglichst vielen gemessenen Werten abzuschätzen [Wilrich 1989]. Dazu heißt es in den Grundsätzen zur Berücksichtigung technischer und statistischer Gegebenheiten bei der Festlegung von Anforderungen und bei deren Überprüfung auf Erfüllung in Technischen Regelwerken [FGSV 1994, S. 17]:

*„An den wahren Wert einer Einheit kann man nur dadurch möglichst nahe herankommen, daß [sic!] man unter konstanten Bedingungen an dieser Einheit möglichst viele Prüfergebnisse bestimmt. [...] Im ungünstigsten Fall hat man nur ein Prüfergebnis, welches dann als Schätzung für den wahren Wert dient.“*

In Bezug auf die ZEB liegt folglich der denkbar ungünstigste Fall einer einzelnen Messung vor, anhand derer auf den wahren Zustand rückgeschlossen werden soll. Daher ist die Kenntnis über die Prüfpräzision eines Messverfahrens von großem Interesse. Dazu werden im Rahmen von Ringversuchen verschiedene Messgeräte auf einer Messstrecke miteinander verglichen. Als Ergebnis dieser Untersuchungen erhält man die Standardabweichung des Prüfverfahrens unter Wiederholbedingungen (selbe Messstrecke, selbes Messgerät bzw. -fahrzeug) und Vergleichbedingungen (selbe Messstrecke, verschiedene Messgeräte bzw. -bedienpersonal). Sie wird dazu verwendet, Aussagen dazu zu treffen, wie exakt ein wahrer Wert anhand eines gemessenen Prüfergebnisses bestimmbar ist.

Die maximal zu erwartende gemessene Zustandsverbesserung innerhalb eines Auswerteabschnittes kann anhand der Präzision eines Prüfverfahrens hergeleitet werden. Dazu seien zwei Messergebnisse  $N_1(\mu_1, \sigma_1)$  und  $N_2(\mu_2, \sigma_2)$  innerhalb eines Auswerteabschnitts zu zwei Messzeitpunkten voneinander unabhängig und normalverteilte Zufallsgrößen. Beide Messergebnisse  $\mu_1$  und  $\mu_2$  streuen um den wahren Wert mit einer Standardabweichung  $\sigma_1$  bzw.  $\sigma_2$ . Dann gilt für den Erwartungswert  $\mu_\Delta$  der gemessenen Zustandsänderung zwischen den beiden Messpunkten:

Formel 35: Berechnung des Erwartungswertes einer Differenz zweier normalverteilter voneinander unabhängiger Größen

$$\mu_\Delta = \mu_{N_2 - N_1} = \mu_2 - \mu_1$$

Durch Addition oder Subtraktion der beiden Zufallsgrößen vergrößert sich die Standardabweichung der Messergebnisdifferenz  $\sigma_\Delta$  zu:

Formel 36: Berechnung der Streuung einer Differenz zweier normalverteilter voneinander unabhängiger Größen

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

Die Abbildung 74 zeigt die dargestellten Zusammenhänge grafisch auf:

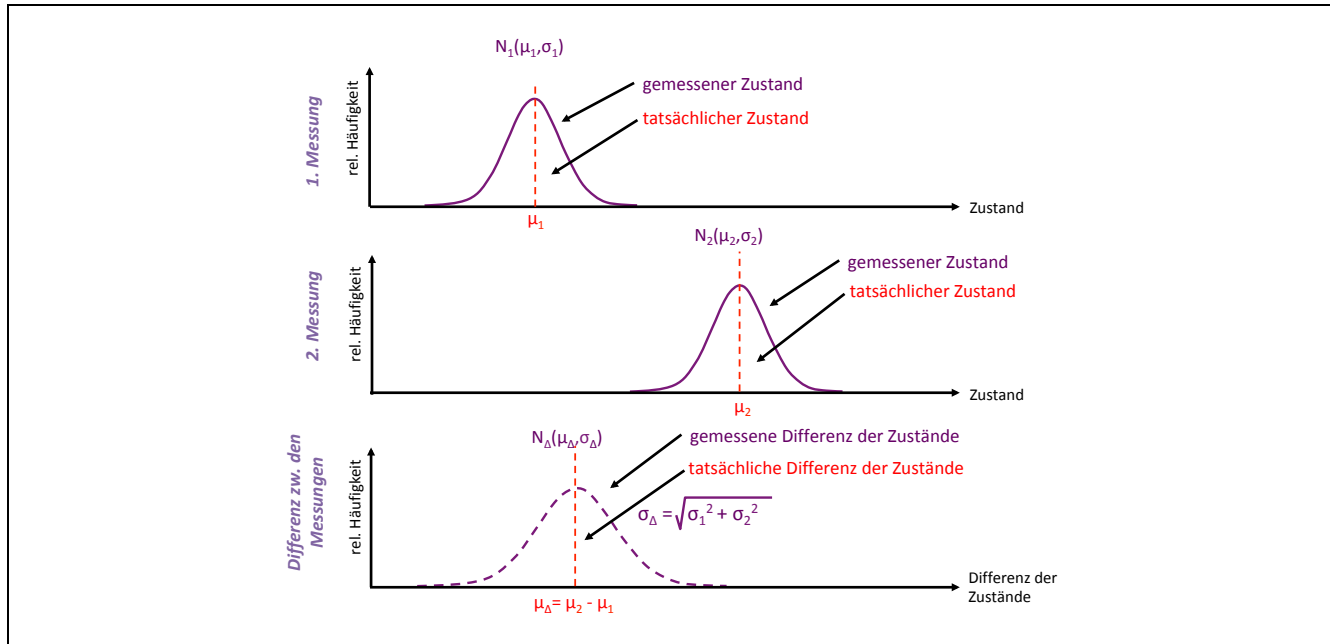


Abbildung 74: Berechnung von Erwartungswert und Standardabweichung der Differenz zweier normalverteilter voneinander unabhängiger Eingangsgrößen

Für voneinander unabhängige Messungen von der gleichen Prüfstelle unter Wiederholbedingungen an einem Messobjekt [Bald et al. 2004], d. h. gleiches Prüfgerät und Bedienpersonal, vereinfacht sich die Formel zu:

Formel 37: Berechnung der Standardabweichung einer Differenz unter Wiederholbedingungen

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{2\sigma_1^2} = \sqrt{2} \cdot \sigma_1 = \sigma_r$$

Die Differenz zwischen zwei Messergebnissen darf die zulässige Spannweite  $r$  nicht überschreiten, die unter Wiederholbedingungen berechnet wird zu:

Formel 38: Berechnung der zulässigen Spannweite zwischen zwei Messergebnissen unter Wiederholbedingungen

$$r = 1,96 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_1 = 2,77 \cdot \sigma_1$$

Die quadrierte Standardabweichung unter Vergleichbedingungen  $\sigma_R^2$  (d. h. voneinander unabhängige Messungen von verschiedenen Prüfstellen am selben Messobjekt) lässt sich aus der Summe der mittleren Varianz unter Wiederholbedingungen  $\sigma_r^2$  und der Prüfstellenvarianz  $\sigma_L^2$  wie folgt berechnen:

Formel 39: Berechnung der Varianz unter Vergleichbedingungen

$$\sigma_R^2 = \sigma_r^2 + \sigma_L^2$$

Die Prüfstellenvarianz  $\sigma_L^2$  beschreibt hierbei die Streuungen der Prüfstellen untereinander [FGSV 1982]. Die entsprechende zulässige Spannweite  $R$  zwischen zwei unter Vergleichbedingungen erhobenen Messergebnissen errechnet sich demnach zu:

Formel 40: Berechnung der zulässigen Spannweite zwischen zwei Messergebnissen unter Vergleichbedingungen

$$R = 1,96 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_R = 2,77 \cdot \sigma_R$$

Die beiden erläuterten zulässigen Spannweiten für 100-m-Auswerteabschnitte sind Bestandteil der ZTV ZEB-StB [2006]. Unter der Annahme, dass eine Zustandsverbesserung zwischen zwei Messzeitpunkten nur durch Maßnahmen der betrieblichen oder baulichen Erhaltung bewirkt werden kann – d. h. der Zustand bleibt konstant oder wird schlechter – ergibt sich für jede Zustandsgröße eine maximal zulässige gemessene Zustandsverbesserung bezogen auf eine auszuwertende Messstreckenlänge von 2 km. Dieser Ansatz liefert jedoch nur teilweise eine Lösung des zuvor beschriebenen Problems.

Die maximal zulässige Zustandsverbesserung kann in einer Übergangsmatrix als zur Matrixdiagonalen parallel verlaufenden Gerade eingezeichnet werden. Alle unterhalb dieser Diagonalen gemessenen Zustandsänderungen wären dann nur noch durch Erhaltungsmaßnahmen begründbar – oder durch tatsächlich in Einzelfällen vorhandene „Heilungen“ des Asphalts, z. B. Verdrückung einer Spurrinne. Alle anderen Zustandsänderungen innerhalb der Übergangsmatrix beinhalten jedoch weiterhin innerhalb der Messpräzision liegende, zufällige Prüffehler.

Jede zu zwei Zeitpunkten gemessene Zustandsänderung lässt sich als zweidimensionale Gaußverteilung abbilden (vgl. Abbildung 75). Setzt man den gemessenen Zustand je Messzeitpunkt als Erwartungswert an, wird der Streubereich um diesen Wert mit Hilfe einer Normalverteilung beschrieben. Die Gaußglocke zeigt, dass zu beiden Messzeitpunkten Unsicherheit hinsichtlich des wahren Wertes vorherrscht, die sich mit Hilfe einer Normalverteilung um den gemessenen Wert ausdrücken lässt. Demnach kann eine Zustandsänderung nicht als einzelner Punkt innerhalb des Streudiagramms, sondern anhand einer isotropen zweidimensionalen Gaußfunktion mit nachfolgender Formel beschrieben werden [Rodner, Süße 2014]:

Formel 41: Zweidimensionale Normalverteilung

$$G(x_1, x_2, 0, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x_1^2 + x_2^2)/(2\sigma^2)}$$

Hierbei bezeichnen  $x_1$  bzw.  $x_2$  den Erwartungswert und  $\sigma$  die zugehörige Streuung zu den beiden Messzeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$ . Die Abbildung 75 veranschaulicht die beschriebene Problematik am Beispiel von zwei gemessenen Zustandsänderungen.



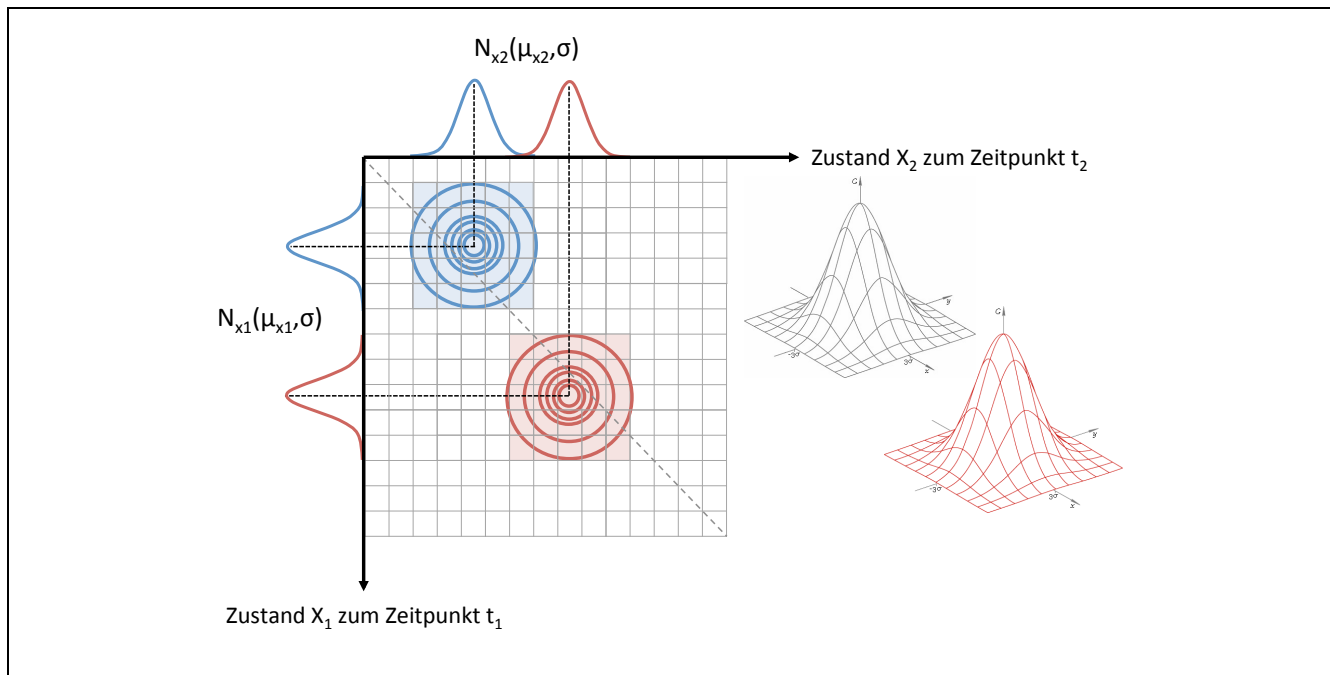


Abbildung 75: Zweidimensionale Fehlerverteilungen mit Isoquanten zur Darstellung von Zustandsänderungen

Je nach Kombination der innerhalb der Gaußglocke (vgl. Abbildung 75) möglichen Zustandsausprägungen sind verschiedene Szenarien denkbar, die bei einem konsequenten Ausschluss von gemessenen Zustandsverbesserungen zu einer statistischen Fehlentscheidung führen können. Diese gelegentlichen Fehlentscheidungen werden bei der Entscheidung über „Annahme“ bzw. „Rückweisung“ als Fehler 1. Art ( $\alpha$ -Fehler) und Fehler 2. Art ( $\beta$ -Fehler) bezeichnet [Bortz 2005]:

Tabelle 19: Eintrittsmöglichkeiten zur Analyse von Fehlern 1. und 2. Art [Bortz 2005]

	<b><math>H_0</math> ist wahr</b>	<b><math>H_0</math> ist falsch</b>
<b><math>H_0</math> wird beibehalten</b>	Richtige Entscheidung mit der <b>Wahrscheinlichkeit</b> $P = 1 - \alpha$	Falsche Entscheidung mit der Wahrscheinlichkeit $P = \beta$ <b>Fehler 2. Art</b>
<b><math>H_0</math> wird verworfen</b>	Falsche Entscheidung mit der Wahrscheinlichkeit $P = \alpha$ <b>Fehler 1. Art</b>	Richtige Entscheidung mit der Wahrscheinlichkeit $P = 1 - \beta$

Im Hinblick auf die Bewertung von Zustandsänderungen lassen sich die Nullhypothese  $H_0$  sowie die zugehörige Gegenhypothese  $H_1$  aufstellen:

$H_0$ : Der Zustand des Auswerteabschnittes hat sich verschlechtert oder ist konstant geblieben.

$H_1$ : Der Zustand des Auswerteabschnittes hat sich verbessert.

---

Daraus ergeben sich die folgenden Szenarien:

**Szenario 1:**

Der Zustand des Auswerteabschnittes hat sich tatsächlich verschlechtert oder ist konstant geblieben.  $\rightarrow H_0$  ist wahr.

Bei der Zustandserfassung wird entsprechend eine Zustandsverschlechterung oder keine Zustandsänderung gemessen.  $\rightarrow H_0$  wird beibehalten.

**Szenario 2:**

Der Zustand des Auswerteabschnittes hat sich tatsächlich verschlechtert oder ist konstant geblieben.  $\rightarrow H_0$  ist wahr.

Bei der Zustandserfassung wird jedoch eine Zustandsverbesserung gemessen.  
 $\rightarrow H_0$  wird verworfen.

**Szenario 3:**

Der Zustand des Auswerteabschnittes hat sich tatsächlich verbessert.  
 $\rightarrow H_0$  ist falsch.

Bei der Zustandserfassung wird eine Zustandsverschlechterung oder keine Zustandsänderung gemessen.  $\rightarrow H_0$  wird beibehalten.

**Szenario 4:**

Der Zustand des Auswerteabschnittes hat sich tatsächlich verbessert.  
 $\rightarrow H_0$  ist falsch.

Bei der Zustandserfassung wird eine Zustandsverbesserung gemessen.  
 $\rightarrow H_0$  wird verworfen.

Im Falle eines konsequenten Ausschlusses von gemessenen Zustandsverbesserungen zwischen zwei Messzeitpunkten (vgl. Kapitel 3.7.1) werden in einem nicht unerheblichen Ausmaß Fehlentscheidungen 1. und 2. Art getroffen. Zum einen werden Auswerteabschnitte, deren Zustand sich tatsächlich verschlechtert hat und jedoch besser gemessen werden, aus den Datensätzen eliminiert. Zum anderen bleiben Auswerteabschnitte innerhalb der Daten weiterhin berücksichtigt, die sich tatsächlich, z. B. durch Maßnahmen der Instandhaltung, verbessert haben, jedoch bei der zweiten Erfassung schlechter gemessen werden.

Für die Beurteilung von derartigen Messergebnissen liefert die Statistik eine Reihe von statistischen Testverfahren, wie z. B. den t-Test oder die Varianzanalyse [Welsch et al. 2000]. Diese statistischen Entscheidungsverfahren dienen dem Zweck, Hypothesen durch die Analyse von Stichproben zu überprüfen. Die grundlegende Vorgehensweise umfasst hierbei die folgenden Schritte [Neitzel 2010]:

- Aufstellen einer Nullhypothese sowie Formulierung der Alternativhypothese als ein- oder zweiseitige Fragestellung
- Festlegung einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  bzw. einer Sicherheitswahrscheinlichkeit  $P = 1 - \alpha$
- Berechnung einer Prüfgröße
- Testentscheidung auf Basis der Gegenüberstellung der Prüfgröße mit einem Grenzwert

Diese Tests ermöglichen beispielsweise den Vergleich einer normalverteilten Größe mit ihrem gegebenen Erwartungswert. Weiterhin können die Erwartungswerte von zwei normalverteilten Messgrößen, die das gleiche Objekt beschreiben, miteinander verglichen werden [Neitzel 2010]. Die hierfür als Datengrundlage verwendeten Verteilungen je Messgröße sind das Ergebnis aus der  $n$ -fachen Messung einer Prüfgröße, deren Verteilung um den wahren Wert als normalverteilt angenommen wird. Je nach Testergebnis wird entschieden, ob sich die Erwartungswerte der beiden Gruppen signifikant voneinander unterscheiden. Dementsprechend ist die Nullhypothese beizubehalten oder ggf. zu verwerfen.

Die Anwendung dieser klassischen Testverfahren auf die Auswertung von Zustandsänderungen von Straßen ist dahingehend problematisch, da in diesem Fall nicht Gruppenmittelwerte, sondern jeweils gemittelte Messwerte über einen Auswerteabschnitt miteinander verglichen werden. Des Weiteren liegt aufgrund der einfachen Messung (einmaliges Messen) des Zustandes je Auswerteabschnitt ein Einzelwert und kein über mehrere Messungen gemittelter Erwartungswert vor.

Die Zufallscharakteristik der einmaligen Messungen sowie des Systemverhaltens erlauben keine analytische Lösung der Problemstellung. Dies bedeutet zugleich, dass eine Quantifizierung der Fehler 1. und 2. Art anhand von realen Straßenzustandsdaten nicht möglich ist. Um dennoch Aussagen zu den Anteilen beider Fehlerarten treffen zu können, wird die Problemstellung im Folgenden mit Hilfe einer Simulation untersucht.

## 5.5 Simulation

### 5.5.1 Allgemeines

Simulationen ermöglichen es, ein zufallsbasiertes System zu untersuchen, Methoden zur Lösung der Problemstellung anhand von fiktiven Zustandsdaten zu entwickeln, zu testen und die Ergebnisse zu bewerten. Hierbei kann der Einfluss einzelner Parameter auf die Ergebnisse innerhalb der Simulation systematisch untersucht werden. Das verwendete Grundmodell basiert auf einer konsequenten Differenzierung zwischen wahren, nicht beobachtbaren Zuständen und gemessenen Zuständen in Form von Messergebnissen (vgl. Abbildung 76).

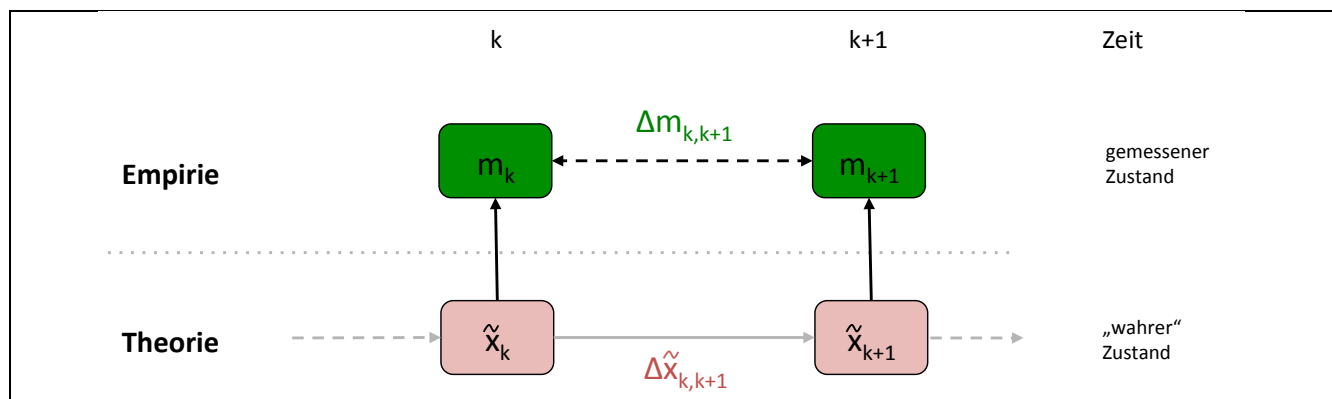


Abbildung 76: Grundmodell der eingesetzten Simulation

In Bezug auf die zuvor erörterte Fragestellung zum Umgang mit gemessenen Zustandsverbesserungen werden im Nachfolgenden die einzelnen Modellierungsschritte innerhalb der Simulation am Beispiel der Zustandsgröße mittlere Spurrinnentiefe im Detail erläutert.

### 5.5.2 Modellierungsschritte

Die Anzahl an simulierten Auswerteabschnitten wurde auf 3.300 gesetzt, um eine vergleichbare Stichprobengröße zu den empirischen Zustandsdaten der DMS zu ermöglichen. In Anlehnung an die Altersverteilung der Deckschichten der DMS (vgl. Kapitel 4.6) wurde ein Analysezeitraum von 30 Jahren gewählt. Des Weiteren wird der bei der routinemäßig durchgeführten ZEB vorliegende Fall des Vergleichs von zwei Erfassungskampagnen mit einem zeitlichen Abstand von vier Jahren zueinander abgebildet. Zusammenfassend wurden für die Simulation die folgenden allgemeinen Randbedingungen gewählt:

- Anzahl an Auswerteabschnitten: 3.300
- Analysezeitraum: 30 Jahre
- Anzahl an Zustandserfassungen je Auswerteabschnitt: 2
- Zeitlicher Abstand zwischen den Zustandserfassungen: 4 Jahre

Die wesentlichen Schritte der Simulation werden im Folgenden erläutert.

#### 1. Abbilden eines wahren Zustandsverlaufs

Zunächst wurde der wahre Zustandsverlauf eines Auswerteabschnittes anhand eines deterministischen Modells beschrieben. Als Funktionstyp des wahren Zustandsverlaufs der Zustandsgröße mittlere Spurrinnentiefe wurde eine physikalisch begründbare und in der Literatur [RPE-Stra 01; Rübensam, Schulze 1994; Oertelt 2007; Scazziga 2008] sehr häufig anzutreffende Potenzfunktion verwendet:

Formel 42: Gewählter Funktionstyp zur Modellierung des wahren Zustandsverlaufs der mittleren Spurrinnentiefe

$$\tilde{x}_k(t) = a \cdot t^b + c$$

mit:  $\tilde{x}_k(t)$  wahrer Zustandsverlauf der mittleren Spurrinnentiefe

$a, b, c$  spezifische Verlaufskoeffizienten

$t$  Alter der Deckschicht in Jahren

Um den Variationsbereich an möglichen Zustandsentwicklungen abzudecken, wurden die Verlaufskoeffizienten  $a$ ,  $b$  und  $c$  innerhalb eines vorgegebenen Wertebereichs variiert und je Auswerteabschnitt eine zufällige Kombination an Werteausprägungen erzeugt.

Die beiden Verlaufskoeffizienten  $a$  und  $b$  wurden in Anlehnung an den in den RPE-Stra 01 enthaltenen Wertebereich der Verhaltensfunktionen variiert. Der Verlaufskoeffizient  $b$  beschreibt die Krümmung der Verhaltenskurve und wurde zwischen 0,2 und 0,9 zufällig variiert. Der Verlaufskoeffizient  $a$  beeinflusst die Stärke des Schadenszuwachs und wurde innerhalb des Wertebereichs zwischen 0,3 und 4,0 zufällig variiert.

Der Verlaufskoeffizient  $c$  beschreibt den Y-Achsenabschnitt der Funktion. Da nach den RPE-Stra 01 die Zustandsprognose auf der Basis von Zustandswerten und nicht anhand von Zustandsgrößen erfolgt, wurde der Variationsbereich für den Verlaufskoeffizienten  $c$  mit Hilfe von empirischen Daten ermittelt. Hierzu wurde die Zustandsverteilung aller Auswerteabschnitte bei einer Liegezeit bis zu einem Jahr sowie die zugehörigen statistischen Kenngrößen Erwartungswert und Standardabweichung verwendet und für jeden simulierten Auswerteabschnitt eine Zufallszahl für den Verlaufskoeffizienten  $c$  aus der in Abbildung 77 dargestellten Verteilung entnommen.

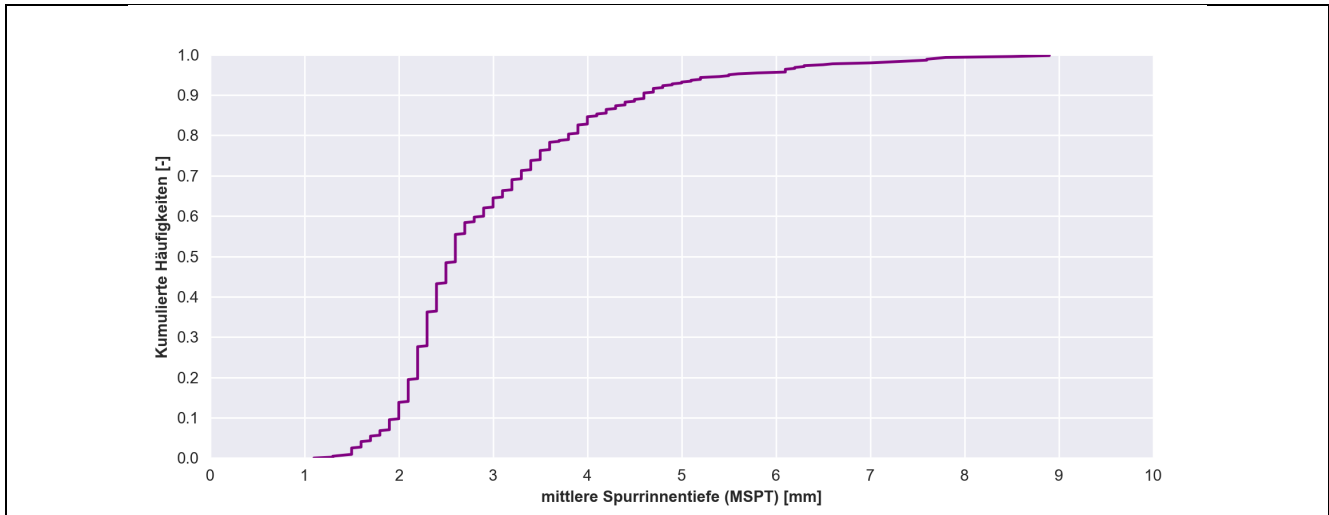


Abbildung 77: Empirische Zustandsverteilung der mittleren Spurrinnentiefe von 100-m-Auswerteabschnitten mit einer Liegezeit bis zu einem Jahr

Durch eine Kombination zufällig gewählter Ausprägungen der Funktionsparameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  wurden die Zustandsverläufe von 3.300 Auswerteabschnitten simuliert. In der Abbildung 78 sind die simulierten Zustandsverläufe über eine Liegezeit von 30 Jahren dargestellt. Der Großteil der Auswerteabschnitte weist nur eine geringe Zunahme der mittleren Spurrinnentiefen auf, wohingegen vereinzelte Auswerteabschnitte bereits nach kurzer Liegezeit einen starken Zuwachs in der mittleren Spurrinnentiefe aufweisen.

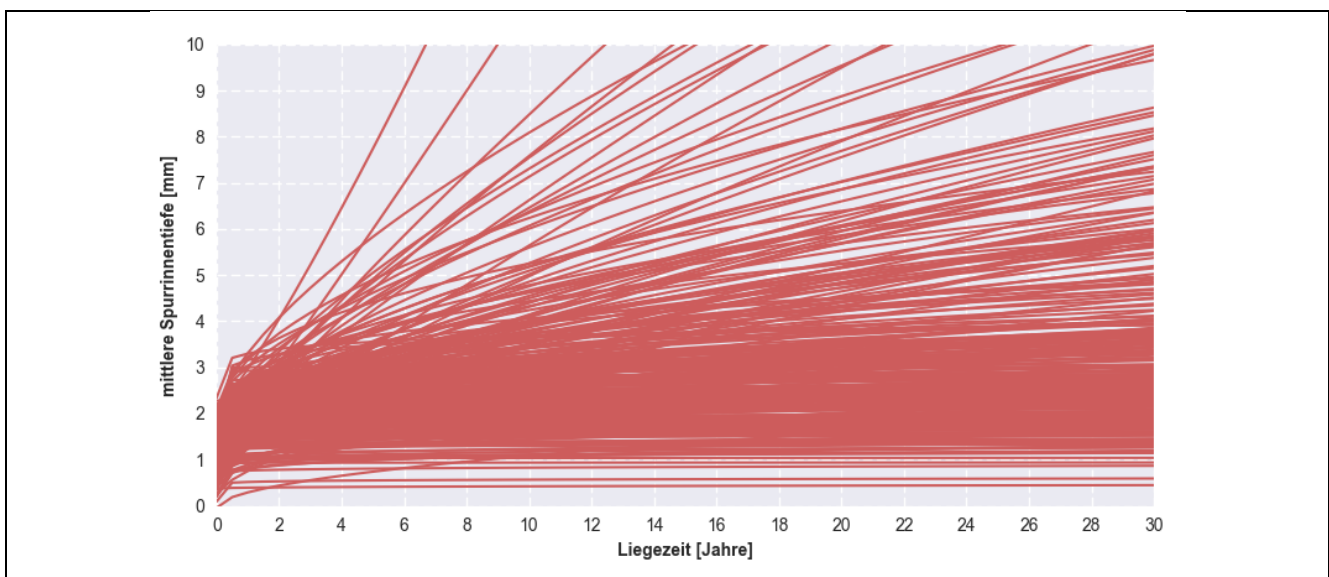


Abbildung 78: Simulierte Zustandsverläufe der mittleren Spurrinnentiefe

## 2. Erzeugung von zufälligen Messergebnissen

Im Anschluss daran wurde ein zufällig gewählter erster Messzeitpunkt je Auswerteabschnitt ausgewählt. Der zweite Messzeitpunkt wurde vier Jahre später, gemäß dem derzeitigen Intervall der ZEB-Kampagnen, gewählt. Die Messergebnisse berechnen sich aus dem wahren Zustand zu den jeweiligen Beobachtungszeitpunkten sowie einem zufälligen gaußverteilten Fehlerterm  $\varepsilon$  im Rahmen der vorgegebenen Messpräzision nach den ZTV ZEB-StB [2006] je Messzeitpunkt:

Formel 43: Erzeugung von zufälligen Messergebnissen entlang des wahren Zustandsverlaufs

$$m_k(t) = a \cdot t^b + c + \varepsilon$$

mit:	$m_k(t)$	$k$ -ter Messwert des wahren Zustands zum Zeitpunkt $t$
	$a, b, c$	spezifische Verlaufskoeffizienten
	$t$	Alter der Deckschicht in Jahren
	$\varepsilon$	zufälliger gaußverteilter Fehlerterm

## 3. Berechnung der Zustands- und Messergebnisdifferenzen

Anschließend wurden sowohl die Differenzen der wahren Zustände als auch der Messergebnisse zwischen den beiden Beobachtungszeitpunkten berechnet. Die wahren Zustandsänderungen berechnen sich aus der Differenz der wahren Werte zu den beiden gewählten Messzeitpunkten.

Formel 44: Berechnung der wahren Zustandsänderung

$$\Delta \tilde{x}_{k,k+1} = \tilde{x}_k - \tilde{x}_{k+1}$$

mit:	$\Delta \tilde{x}_{k,k+1}$	wahre Zustandsänderung zwischen zwei Beobachtungszeitpunkten
	$\tilde{x}_k$	wahrer Zustand zum Beobachtungszeitpunkt $k$
	$\tilde{x}_{k+1}$	wahrer Zustand zum Beobachtungszeitpunkt $k + 1$

Die Messergebnisdifferenzen berechnen sich aus der Differenz der Messergebnisse zu den beiden gewählten Messzeitpunkten.

Formel 45: Berechnung der Messergebnisdifferenz

$$\Delta m_{k,k+1} = m_k - m_{k+1}$$

mit:	$\Delta m_{k,k+1}$	Differenz der Messergebnisse von zwei Beobachtungszeitpunkten
	$m_k$	Messergebnis zum Beobachtungszeitpunkt $k$
	$m_{k+1}$	Messergebnis zum Beobachtungszeitpunkt $k + 1$

### 5.5.3 Ergebnisse

In Abbildung 79 sind die absoluten Häufigkeiten der simulierten wahren Zustandsänderungen den absoluten Häufigkeiten der Messergebnisdifferenzen gegenübergestellt. Die simulierten Differenzen der Messergebnisse zeigen ein ähnliches Streubild wie es bei den Kampagnenvergleichen der DMS zu beobachten ist (vgl. Kapitel 5.3). Der Großteil der Messwertdifferenzen befindet sich entlang der Matrixdiagonalen und ist im Wesentlichen von der natürlichen Streuung der Messwerte geprägt. Im Vergleich dazu ermöglicht die linke Abbildung der absoluten Häufigkeiten der wahren Zustandsänderungen einen bisher nicht vorhandenen Eindruck zur wahren Zustandsentwicklung der Auswerteabschnitte. Es ist erkennbar, dass die wahren Zustandsänderungen vorrangig entlang der Matrixdiagonalen zu beobachten sind und nur gering in Richtung Zustandsverschlechterung streuen. Weiterhin ist in den höheren Zustandsklassen eine tendenziell größere Zustandsverschlechterung zu beobachten.

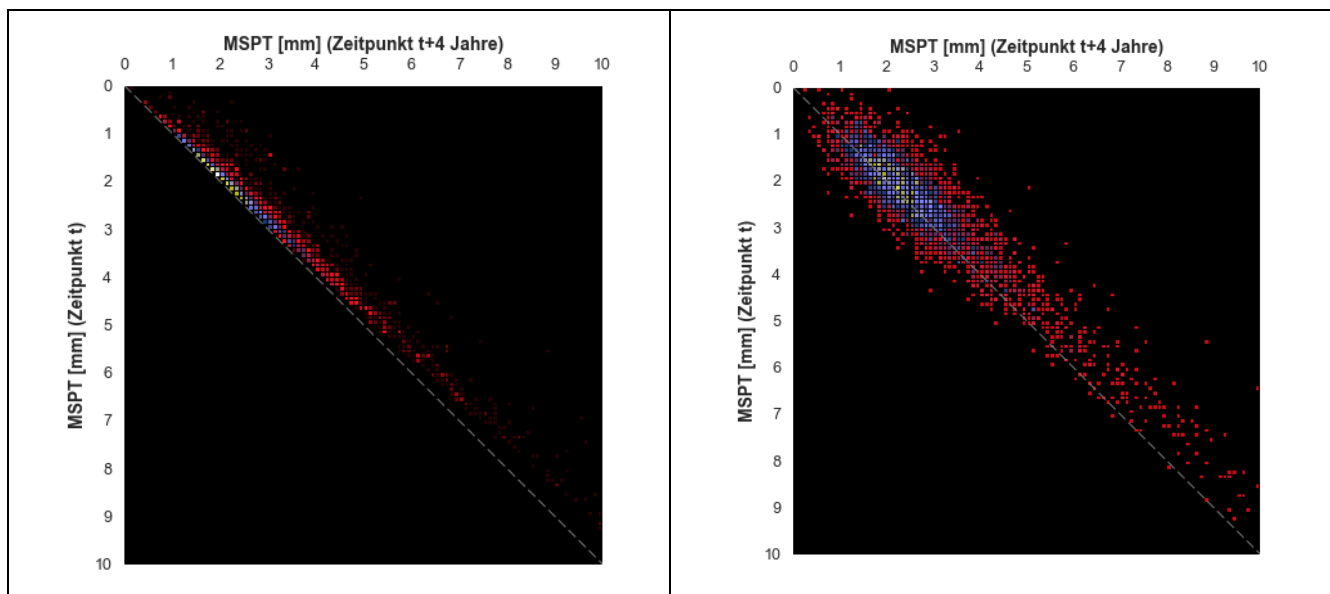


Abbildung 79: Absolute Häufigkeiten an wahren Zustandsänderungen (links) und Differenzen der Messergebnisse (rechts)

Ein Vergleich der kumulierten Häufigkeiten der wahren und der gemessenen Zustandsänderungen der mittleren Spurrinntiefen ist in Abbildung 80 dargestellt.

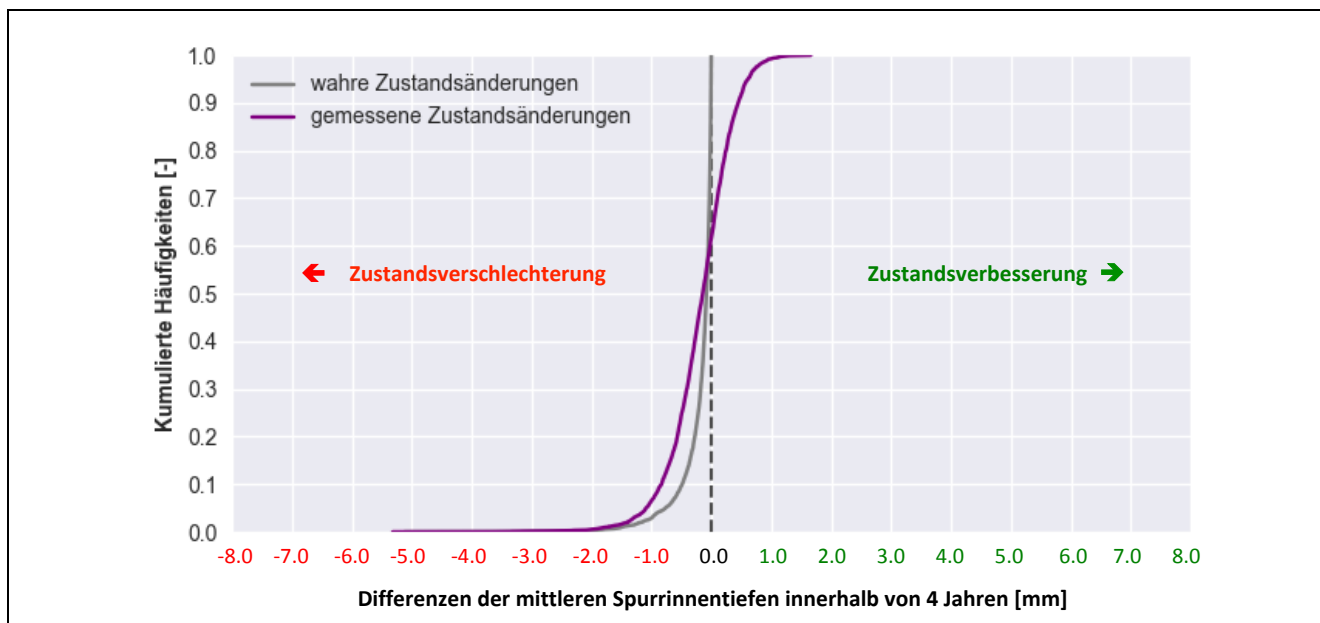


Abbildung 80: Kumulierte Häufigkeiten der wahren und der gemessenen Zustandsänderungen der mittleren Spurrinntiefen

Aufgrund der vorgegebenen Randbedingungen innerhalb der Simulation sind keine wahren Zustandsverbesserungen ( $H_0$  ist falsch) sowie nur geringe Zustandsverschlechterungen von bis zu 1,5 mm innerhalb des Beobachtungszeitraums von vier Jahren zu beobachten. Im Vergleich dazu wird bei ca. 37 % aller simulierten Zustandsverläufe eine Zustandsverbesserung gemessen, obwohl tatsächlich eine Zustandsverschlechterung vorliegt (Fehler 1. Art). Nur bei etwa 63 % der simulierten Auswerteabschnitte wird korrekterweise eine Zustandsverschlechterung anhand der Messungen festgestellt. Da innerhalb der Simulation eine Zustandsverbesserung ausgeschlossen wurde, sind keine Fehler 2. Art zu beobachten. In Tabelle 20 sind die absoluten und relativen Anteile der korrekten und falschen Entscheidungen anhand der Messwertdifferenzen quantifiziert.

Tabelle 20: Anteile der Fehler 1. und 2. Art bei 3.300 simulierten Auswerteabschnitten

	$H_0$ ist wahr	$H_0$ ist falsch	Summe
$H_0$ wird beibehalten	2.075 (62,9 %)	0 (0,0 %)	2.075 (62,9 %)
$H_0$ wird verworfen	1.225 (37,1 %)	0 (0,0 %)	1.225 (37,1 %)
Summe	3.300 (100,0 %)	0 (0,0 %)	3.300 (100,0 %)

Sowohl die Präzision des Messverfahrens als auch der Abstand zwischen den beiden Erfassungszeitpunkten stellen eine Einflussgröße auf die Ergebnisse dar. Um den Einfluss dieser beiden Eingangsgrößen auf den Anteil an getroffenen Fehlentscheidungen quantifizieren zu können, wurden im Rahmen der Simulation beide Größen innerhalb eines Wertebereiches systematisch variiert und die Simulationsläufe mit jeweils 1.000 Auswerteabschnitten durchgeführt. Für die Simulationsläufe wurden die folgenden allgemeinen Randbedingungen festgelegt:



- Anzahl an Auswerteabschnitten je Simulationsdurchlauf: 1.000
- Analysezeitraum: 30 Jahre
- Anzahl an Messergebnissen je Auswerteabschnitt: 2
- Variation des zeitlichen Abstands zwischen zwei Erfassungen: 0 Jahre bis 10 Jahre
- Variation der Standardabweichung unter Vergleichbedingungen: 0,0 mm bis 1,0 mm

Die Ergebnisse der Simulationsdurchläufe zeigen, dass naturgemäß Fehlentscheidungen 1. Art getroffen werden, sobald die Messungen fehlerbehaftet sind. Der Anteil an korrekten Entscheidungen steigt mit einem größer werdenden Abstand zwischen den beiden Erfassungszeitpunkten auf bis zu etwa 80 %. Dies ist jedoch nur dann der Fall, wenn die Standardabweichung unter Wiederhol- bzw. Vergleichbedingungen kleiner als 0,15 mm ist. Im Bereich von höheren Standardabweichungen nimmt der Einfluss des zeitlichen Abstandes zwischen den Erfassungen deutlich ab, sodass der Anteil an korrekten Entscheidungen zwischen 50 % und 60 % beträgt. In Abbildung 81 ist das Ergebnis der Simulationsläufe grafisch dargestellt.

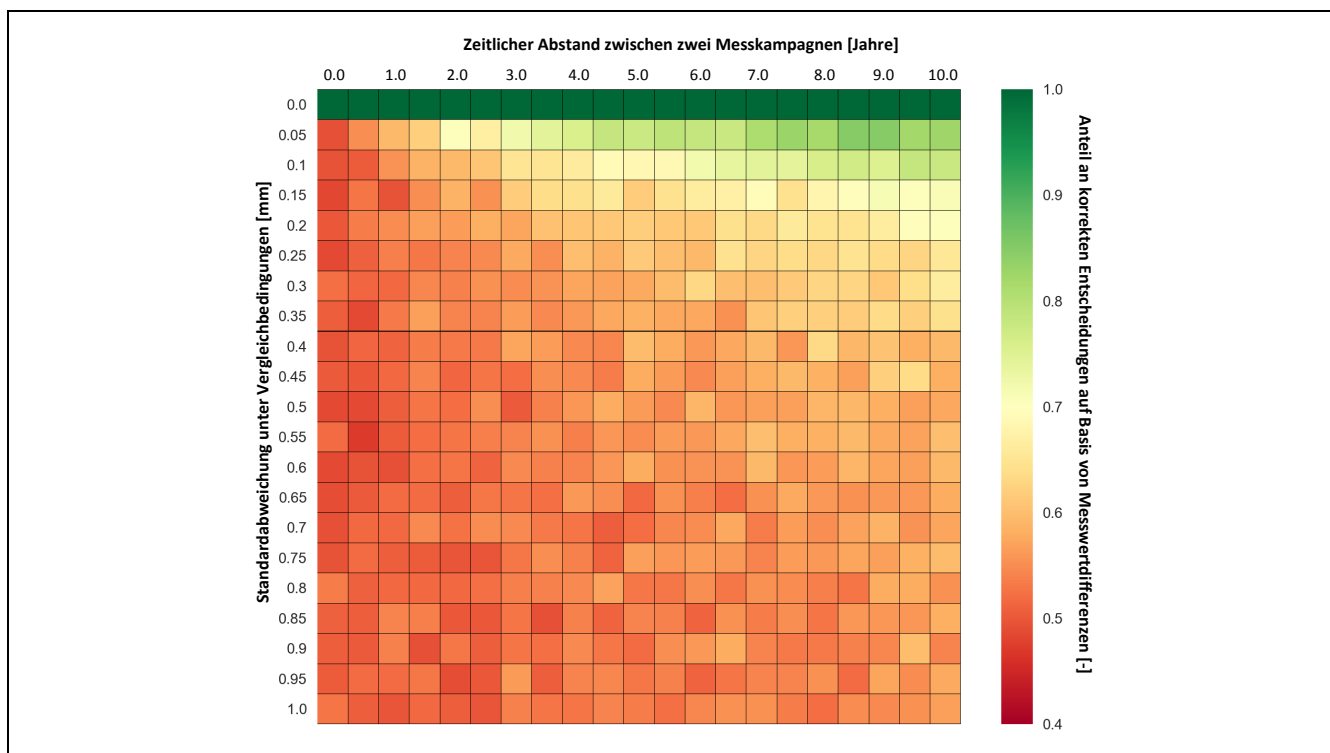


Abbildung 81: Anteil an korrekten Beurteilungen von Zustandsänderungen auf Basis von Messwertdifferenzen in Abhängigkeit des zeitlichen Abstandes zwischen den beiden Messzeitpunkten und der Messpräzision

Zum einen lässt sich der Fehler 1. Art reduzieren, indem der zeitliche Abstand zwischen zwei Erfassungskampagnen vergrößert wird. Dadurch nimmt das Verhältnis zwischen wahrer Zustandsänderung und dem Messrauschen zu, sodass die Zustandsentwicklung weniger stark von den Messungenauigkeiten überdeckt wird. Zum anderen bewirkt eine Erhöhung der Messpräzision ebenfalls eine Reduzierung des Anteils des Fehlers 1. Art. Die praktische Umsetzung dieses Ansatzes wäre mit einem erhöhten Aufwand bei der Qualitätssicherung der ZEB-Prozesse oder mit einer Doppelmessung zu erreichen. Beide Varianten sind mit zusätzlichen finanziellen und personellen Ressourcen verbunden.

---

#### 5.5.4 Bewertung der Ergebnisse

Zusammenfassend ist festzustellen, dass eine Rückrechnung auf wahre Zustandsänderungen anhand von zwei Messergebnissen ohne das Wissen zusätzlicher Randbedingungen nicht möglich ist. Als Ursache ist insbesondere die bekannte Problematik zu nennen, dass für die Lösung des zuvor beschriebenen Gleichungssystems zu viele unbekannte Parameter vorliegen, die anhand von zwei Messzeitpunkten nicht eindeutig geschätzt werden können [vgl. z. B. Irle 2016]. Zusätzliche Informationen bzw. Randbedingungen können nur durch weitere Messergebnisse in das Modell miteinbezogen werden.

Eine wesentliche Erkenntnis dieser Untersuchung ist, dass eine korrekte Abschätzung der Zustandsentwicklung anhand von Zustandsdaten zweier Erfassungskampagnen nicht möglich ist. Der Vergleich zwischen wahren und gemessenen Zustandsänderungen innerhalb der Simulation hat gezeigt, dass sowohl die Präzision des Messverfahrens als auch der Abstand zwischen den beiden Erfassungskampagnen einen bedeutenden Einfluss auf die Ergebnisse darstellen. Die Präzision des Messverfahrens bewirkt naturgemäß eine nicht unerhebliche Streuung in den Daten, die die wahren Zustandsänderungen innerhalb des Betrachtungszeitraumes überlagern. Dies bedeutet zugleich, dass die oftmals angewendete Vorgehensweise zur Ableitung von Übergangswahrscheinlichkeiten zwecks Entwicklung und Anwendung eines Markov-Prozesses (vgl. Kapitel 3.7.1) als nicht zielführend zu bewerten ist. Damit sind zugleich die stets genannten Vorteile des Markov-Prozesses eines geringen Datenumfangs von lediglich zwei Messkampagnen sowie der scheinbar geringe Aufwand der Datenaufbereitung in Frage zu stellen.

Im Folgenden wird daher der Ansatz um weitere auf der DMS durchgeführte Messkampagnen erweitert und ein entsprechendes auf Zeitreihen basierendes, probabilistisches Modell konzipiert. Es wird eine Methodik vorgestellt, die es erlaubt anhand einer Zeitreihe und eines angenommenen Systemverhaltens auf den wahren Zustandsverlauf eines Auswerteabschnittes unter Berücksichtigung der Messpräzision zurückzuschließen.

### 5.6 Anwendung des Kalman-Filters auf Straßenzustandsdaten

#### 5.6.1 Allgemeines

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass für die Ermittlung der wahren Zustände mehr Informationen in Form von weiteren Messungen innerhalb eines Auswerteabschnittes benötigt werden. Da bei der ZEB lediglich einfache Messungen ohne Wiederholung durchgeführt werden, können diese Informationen nur aus vorherigen Messkampagnen entnommen werden.

Die vorherigen Auswertungen haben zudem gezeigt, dass die Reststreuungen innerhalb der Zeitreihen einer Zustandsgröße aufgrund der Messpräzision nicht unerheblich sind. Dies kann mit klassischen Zeitreihenanalysen nicht abgebildet werden. Nach Lytton [1987] sollte ein Prognosemodell sowohl den Aspekt von statistisch abgesicherten Analysen enthalten als auch das mechanistische Werkstoffverhalten korrekt abbilden.

Die Bayes'sche Statistik bietet den Vorteil, dass sie die genannten Aspekte inklusive sowie die Berücksichtigung von Messunsicherheiten innerhalb eines Modells abbilden kann. Der auf einem Kalman-Filter basierende Modellansatz differenziert zwischen dem wahren, nicht direkt beobachtbaren Zustand, dem gemessenen Zustand in Form von Beobachtungen sowie einem mit Hilfe eines Modells geschätzten Zustands eines Systems zu jeweils diskreten Zeitpunkten (vgl. Kapitel 3.6.3). Durch die Kombination aus einem a priori festgelegten Systemverhalten und dem kontinuierlichen Abgleich

zwischen erwarteten und gemessenen Zuständen wird auf den „wahren“ Zustandsverlauf zurückgeschlossen. Die grundlegende Modellstruktur ist in der Abbildung 82 dargestellt.

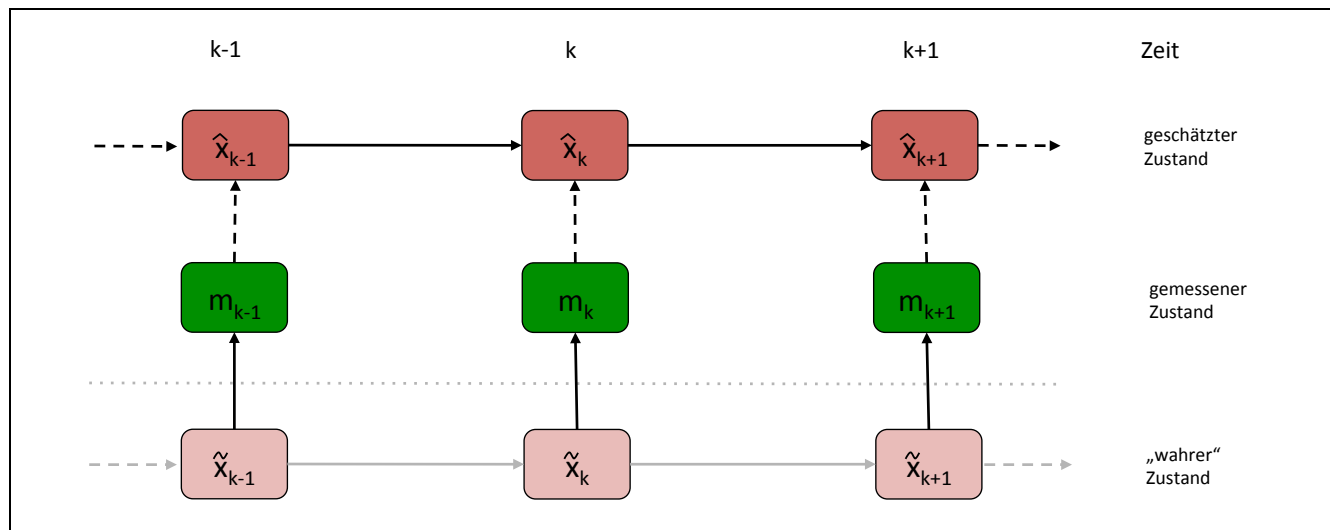


Abbildung 82: Grundidee zur Modellstruktur

In der Abbildung 83 ist die Funktionsweise des Kalman-Filters am Beispiel der Analyse einer Zeitreihe von Straßenzustandsdaten dargestellt. In diesem Beispiel liegen zu Beginn der Zeitreihe keinerlei Informationen zum Zustand einer Straße vor. Daher erfolgt zunächst eine erste Messung, die ein Messergebnis mit einer definierten Präzision liefert (1. Messergebnis). Auf Basis dieser ersten Schätzung wird mit Hilfe einer Funktion zur Beschreibung der Zustandsänderung der Zustand für den nächsten Zeitschritt prognostiziert. Anschließend wird zu diesem Zeitschritt der Zustand erneut gemessen (2. Messergebnis). Die Verteilung des prognostizierten Zustandes sowie die Verteilung des zweiten Messergebnisses werden nun gemittelt und zu einer neuen Zustandsverteilung zusammengesetzt, die als wahrscheinlichster Schätzer für den aktuellen Zustand bezeichnet wird. Für den nächsten Zeitschritt wird nun diese Zustandsverteilung erneut mit Hilfe der Verteilung der Zustandsänderung transformiert und anschließend mit der Verteilung des Messergebnisses zum dritten Messzeitpunkt verglichen. Die beschriebene Vorgehensweise wird über alle Zeitschritte angewendet (vgl. Abbildung 83).

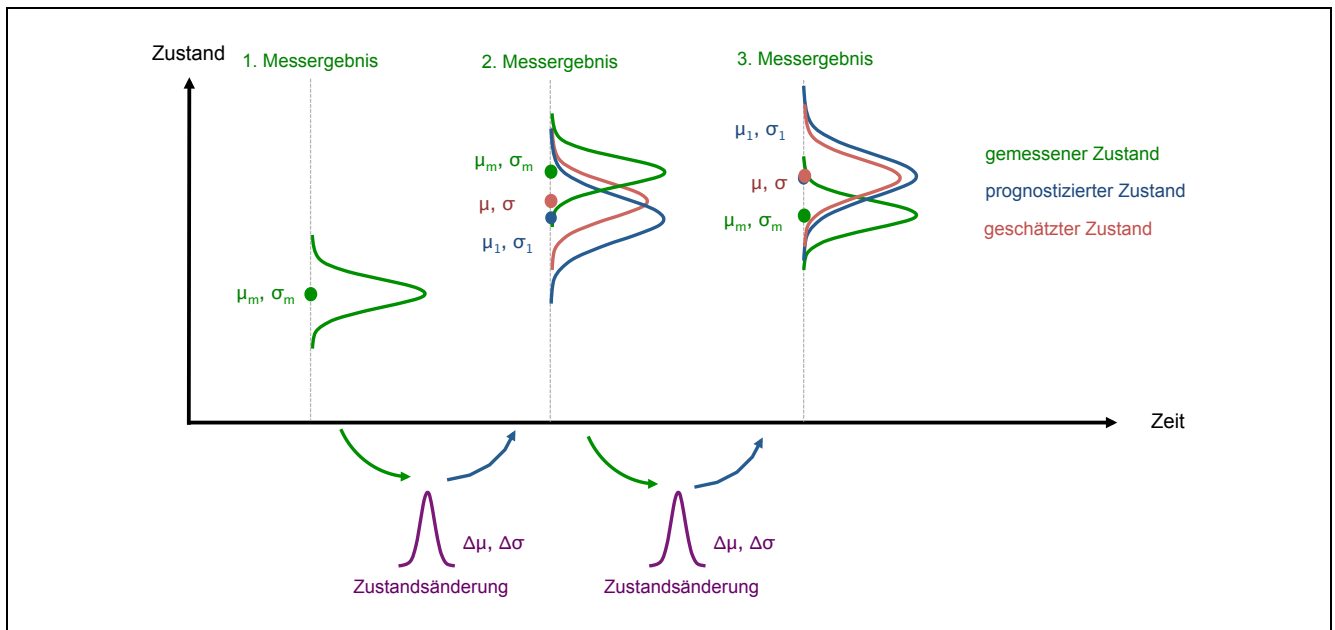


Abbildung 83: Funktionsweise des Kalman-Filters bei einer Zeitreihe

Für die Übertragung der beschriebenen Methodik in ein Modell sind Zustandsdaten zu diskreten Messzeitpunkten sowie Informationen zum Ausgangszustand und der erwarteten Zustandsänderung zwischen zwei Messzeitpunkten notwendig. Erstere Information liegt anhand der ZEB-Daten vor. Letztere Informationen müssen mit Hilfe eines Teilmodells erarbeitet und parametrisiert werden.

### 5.6.2 Datengrundlage und -aufbereitung

#### Zuordnung der Liegezeiten zu den ZEB-Messergebnissen

Die zuvor vorgestellte Methodik der Datenaufbereitung mit Hilfe eines Kalman-Filters wird im Folgenden auf die Messergebnisse der ZEB-Kampagnen 2001, 2005, 2009, 2013 sowie den halbjährlichen Zustandserfassungen zwischen 2011 und 2015 angewendet. Für jeden Auswerteabschnitt liegt nur ein begrenztes Zeitfenster innerhalb der gesamten Nutzungsdauer vor, in dem der Zustand der Fahrbahnoberfläche erfasst wurde. Zudem variiert die Liegezeit der in dieser Untersuchung betrachteten Auswerteabschnitte aufgrund von unterschiedlichen Herstellungsjahren. Die Grundgesamtheit beinhaltet sowohl kürzlich erneuerte Straßenabschnitte als auch Bereiche, die sich bereits am Ende ihrer Nutzungsdauer befinden.

Um die Daten in Abhängigkeit des Alters der Fahrbahnoberfläche vergleichen zu können, wurden die Zustandsdaten je Messkampagne mit der Liegezeit der Fahrbahnoberfläche verknüpft. Dies wurde anhand der zuletzt durchgeführten Erhaltungsmaßnahme und den vorliegenden Informationen aus den Aufbaudaten umgesetzt. Die Abbildung 84 zeigt exemplarisch die Messergebnisse für die Zustandsgröße mittlere Spurrinnentiefe zu unterschiedlichen Erfassungszeitpunkten respektive unterschiedlichen Liegezeiten eines 100-m-Auswerteabschnittes.

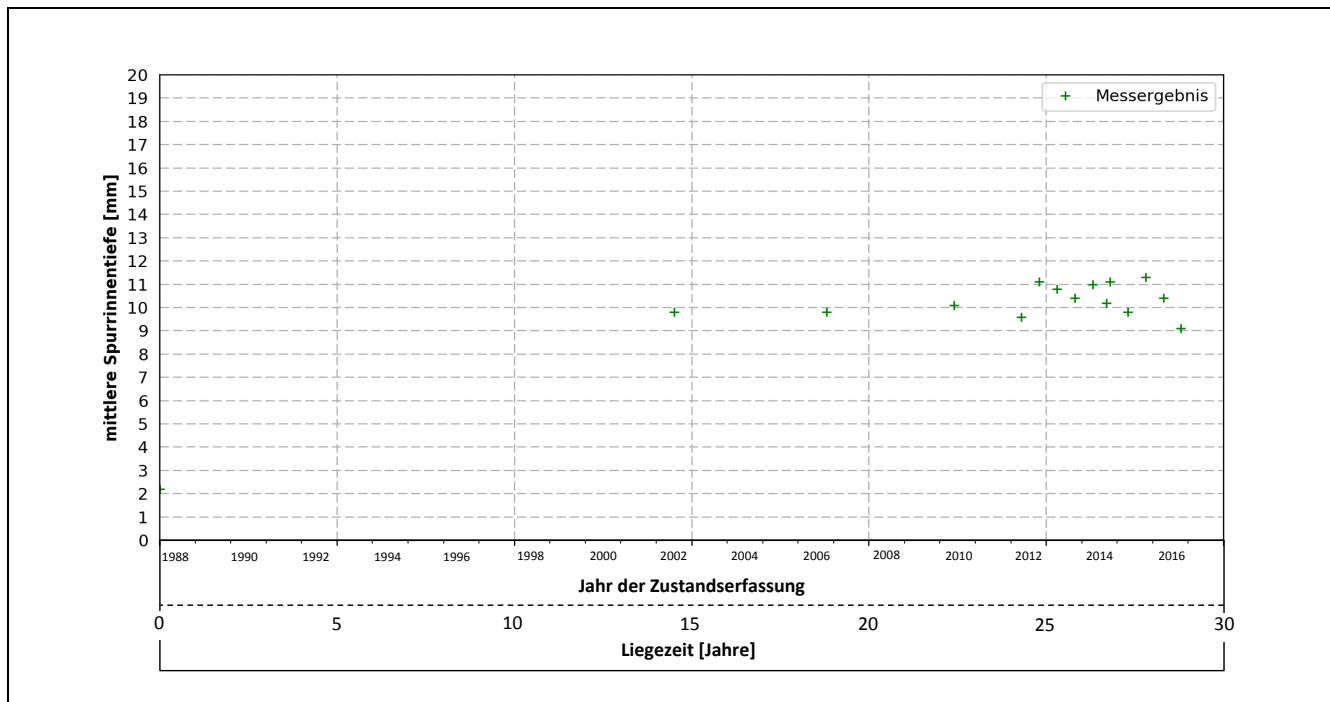


Abbildung 84: Messergebnisse zu mehreren Erfassungszeitpunkten eines Auswerteabschnittes

### 5.6.3 Parametrisierung mittels Simulation

Das Ziel des Kalman-Filters ist die bestmögliche Abbildung des wahren Zustandsverlaufs eines Auswerteabschnittes. Als Basis für die Übergangsfunktion des Kalman-Filters dient das Modell des physikalischen Systems, das sich anhand von Differentialgleichungen beschreiben lässt. Für eine Anwendung des Kalman-Filters werden die Kovarianzmatrix des Messrauschens, der Ausgangszustand des Systems, die Systemgleichung sowie die Kovarianzmatrix des Systemrauschens benötigt [Marchthaler, Dingler 2017]. Erstere wird im vorliegenden Fall auf Basis der in der Literatur enthaltenen Präzision der Messverfahren im Rahmen von ZEB-Kampagnen angesetzt [vgl. Schmidt 2010].

Für die Parametrisierung der systembezogenen Größen können grundsätzlich mehrere Berechnungsmethoden verwendet werden. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei oftmals die optimale Ermittlung der Störgröße (vgl. Kapitel 3.6.4) dar. Die Kovarianzmatrix des Systemrauschens ist eine abstrakte Größe, die Ungenauigkeiten in der Modellierung abbildet [Marchthaler, Dingler 2017]. Da die wahre Zustandsentwicklung eines Auswerteabschnittes in der Regel unbekannt ist, erfolgt die Parametrisierung der beschriebenen Eingangsgrößen in Anlehnung an Marchthaler und Dingler [2017] anhand einer Simulation (vgl. Anhang A3). Die methodische Vorgehensweise ist in der Abbildung 85 dargestellt.

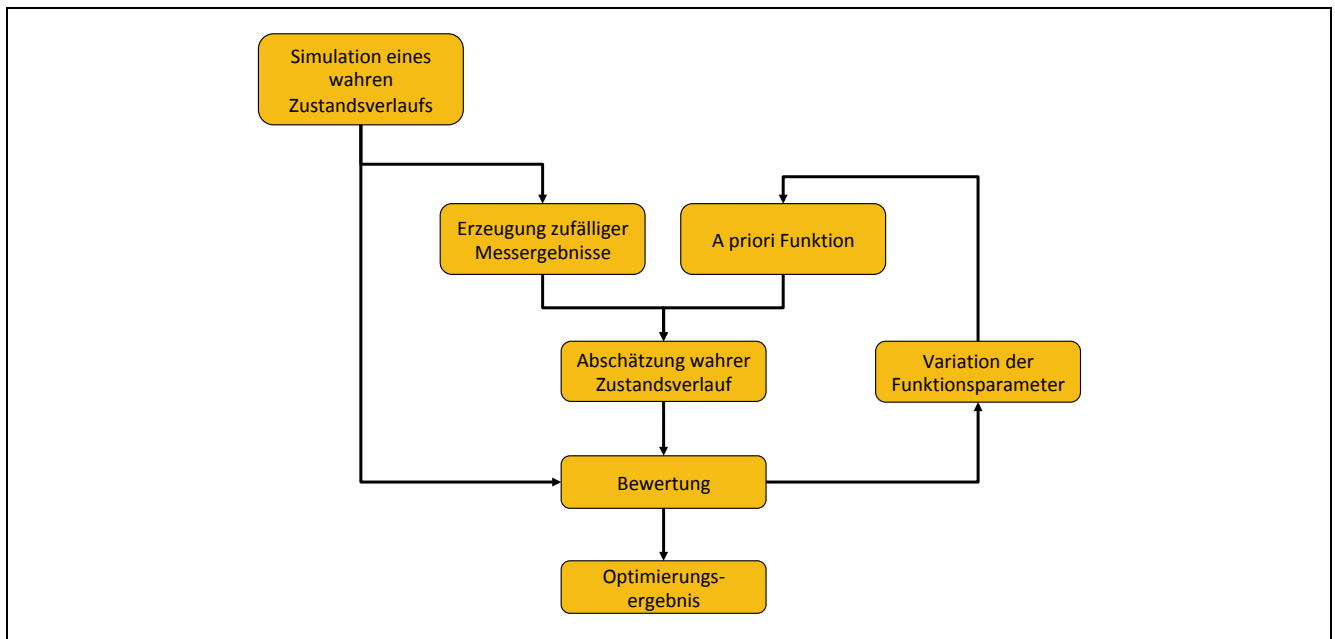


Abbildung 85: Methodik zur Parametrisierung des Kalman-Filters

### 1. Simulation eines wahren Zustandsverlaufs

Zunächst werden, analog zur Vorgehensweise in Kapitel 5.5.2, wahre Zustandsverläufe von fiktiven Auswerteabschnitten anhand eines deterministischen Funktionstyps modelliert.

### 2. Erzeugung von zufälligen Messergebnissen

Zu den jeweiligen Erfassungszeitpunkten der Auswerteabschnitte der DMS werden anschließend zufällige Messergebnisse entlang des simulierten wahren Zustandsverlaufs erzeugt (vgl. Kapitel 5.5.2).

### 3. A priori Funktion

Die a priori Funktion beschreibt das zu erwartende Systemverhalten anhand einer Systemgleichung oder einer Transitionsmatrix, welche für die Prädiktion innerhalb des Kalman-Filters verwendet wird. Je besser die vorgegebene a priori Funktion dem wahren Zustandsverlauf entspricht, desto geringere Abweichungen sind zwischen dem wahren und dem geschätzten Zustandsverlauf zu beobachten. Mit einer zunehmenden Anzahl an Messergebnissen nimmt der Einfluss der vorgegebenen a priori Funktion auf das Ergebnis des geschätzten Zustandsverlaufs ab. Im Rahmen des Kalman-Filters wird eine lineare Systemgleichung verwendet. Zum einen muss für die Systemgleichung die erwartete mittlere Zustandsänderung  $\Delta\mu$  innerhalb eines Zeitschrittes geschätzt werden. Zum anderen ist die Unsicherheit dieser Schätzung anhand einer zugehörigen Standardabweichung  $\Delta\sigma$  anzugeben.

### 4. Abschätzung des wahren Zustandsverlaufs

Nachdem eine Parametrisierung der a priori Funktion ausgewählt ist, kann eine erste Abschätzung des wahren Zustandsverlaufs mit Hilfe des Kalman-Filters erfolgen.

## 5. Bewertung der Abschätzung

Als Bewertungskriterium für die Abschätzung des wahren Zustandsverlaufs werden die quadrierten Abweichungen zwischen dem simulierten wahren Zustandsverlauf und der mit Hilfe des Kalman-Filters geschätzten Zustandsentwicklung je Zeitschritt und Auswerteabschnitt betrachtet. Das Ziel der Optimierung ist die Ermittlung derjenigen Parameterkombination mit den geringsten Abweichungen:

Formel 46: Minimum der quadrierten Abweichungen als Optimierungskriterium

$$\min \left\{ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^k (\tilde{x}_{ij} - \hat{x}_{ij})^2 \right\}$$

mit:	$\tilde{x}_{ij}$	wahrer Zustand des Auswerteabschnittes i zum Zeitpunkt j
	$\hat{x}_{ij}$	geschätzter Zustand des Auswerteabschnittes i zum Zeitpunkt j
	$k$	Zeitpunkt
	$n$	Anzahl an Auswerteabschnitten

## 6. Systematische Variation der Parameter

Um die über alle Auswerteabschnitte geeignetste Parameterkombination zu bestimmen, wurden der Erwartungswert sowie die Varianz der a priori Zustandsänderung systematisch variiert. Im Rahmen der Parameterstudie wird in Anlehnung an die Ergebnisse der Voruntersuchungen aus Kapitel 5.3 für den Erwartungswert der geschätzten Zustandsänderung ein Analysebereich zwischen 0,0 mm (keine Zustandsänderung) und +0,2 mm (Zustandsverschlechterung) innerhalb eines Jahres gewählt, da eine tatsächlich vorhandene mittlere Zustandsverbesserung ohne Erhaltungsmaßnahmen als unwahrscheinlich angesehen wird. Die als Störgröße bezeichnete zugehörige Varianz der geschätzten Zustandsänderung wird zwischen 0,0 mm<sup>2</sup> und 0,2 mm<sup>2</sup> variiert.

## 7. Optimierungsergebnis

Die Abbildung 86 zeigt das mit Hilfe der beschriebenen Simulation ermittelte Kennfeld für die beiden Parameter Erwartungswert und Varianz der geschätzten Zustandsänderung innerhalb eines Jahres. Als Bewertungskriterium ist hierbei die mittlere Abweichung je Zeitschritt zwischen den wahren und den geschätzten Zuständen über alle diskreten Zeitpunkte einer Zeitreihe und alle 100-m-Auswerteabschnitte dargestellt.

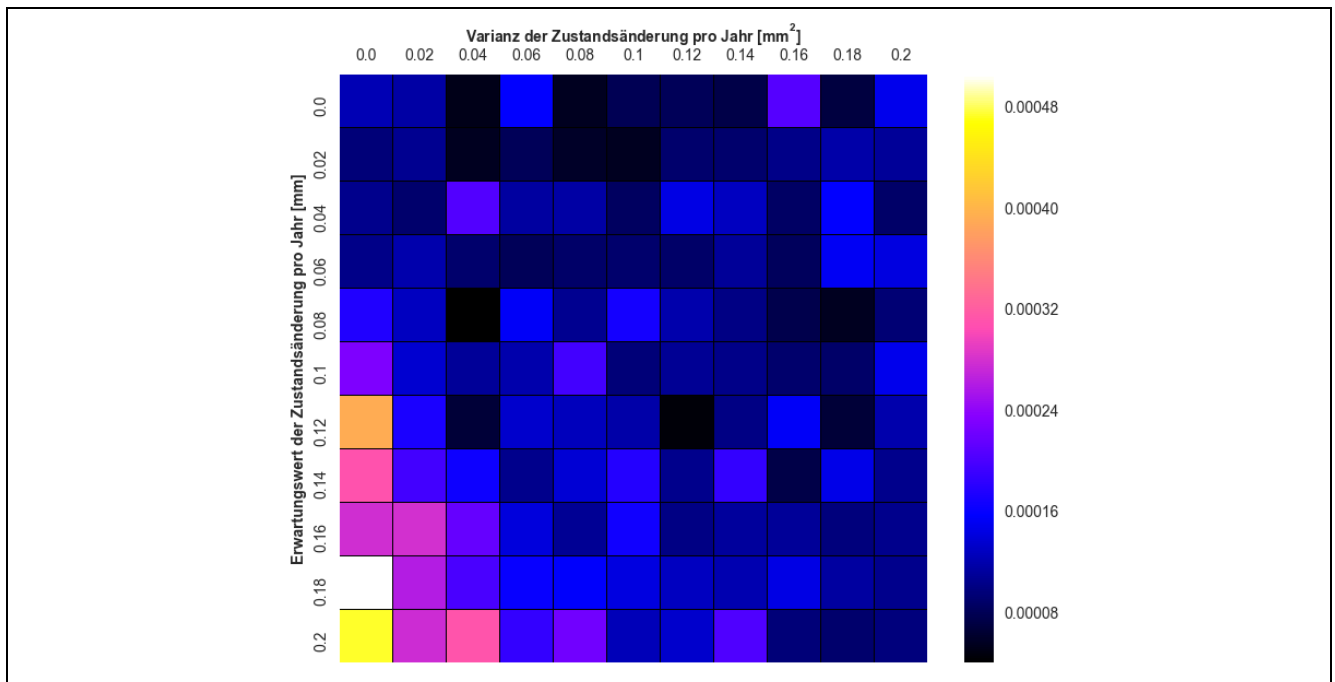


Abbildung 86: Mittlere Abweichung zwischen wahren und geschätzten Zuständen je Zeitschritt in Abhängigkeit des a priori Systemverhaltens

Mit einer geschätzten mittleren Zustandsverschlechterung von 0,12 mm und einer Varianz von 0,12 mm<sup>2</sup> innerhalb eines Jahres sind die geringsten Abweichungen zwischen wahren und geschätzten Zuständen zu erwarten.

#### 5.6.4 Ergebnisse

In der Abbildung 87 ist das ermittelte Filterergebnis eines Auswerteabschnittes exemplarisch dargestellt. Zu erkennen sind der simulierte wahre Zustandsverlauf sowie die darum zufällig verteilten Messergebnisse. Der auf Basis der erzeugten Messergebnisse und der vorgegebenen Prozessfunktion ermittelte geschätzte Zustandsverlauf weist geringe Abweichungen zu dem wahren Zustandsverlauf auf.

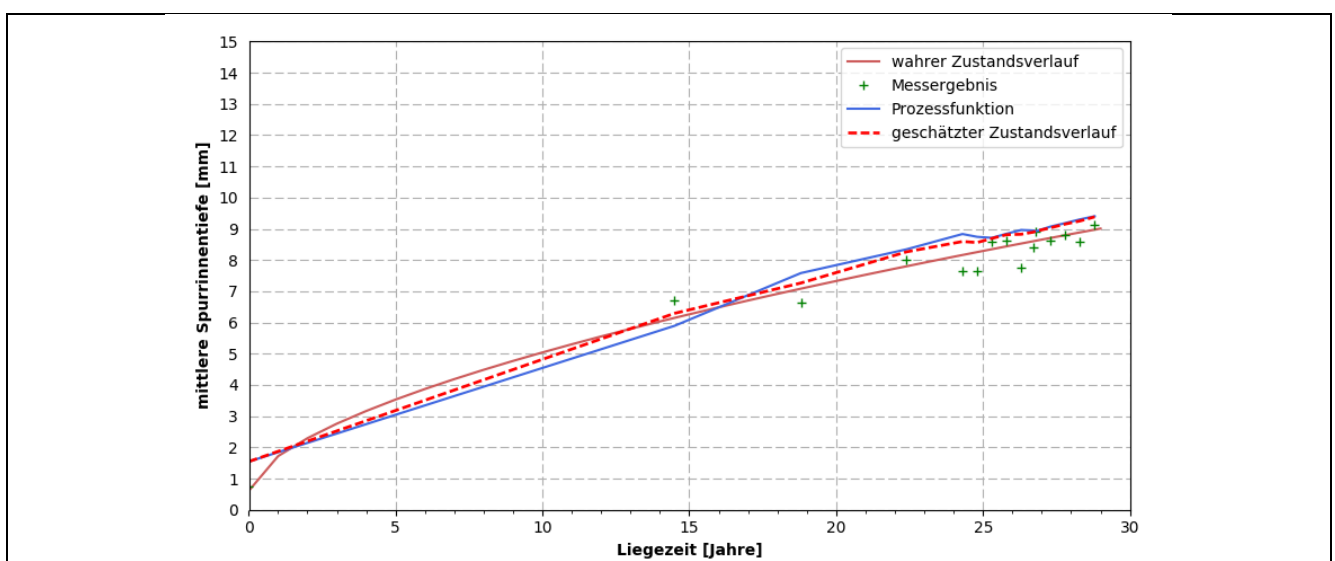


Abbildung 87: Vergleich zwischen wahren und geschätztem Zustandsverlauf eines Auswerteabschnittes



---

Nach Abschluss der Parametrisierung der Systemgleichung innerhalb des Kalman-Filters wurde das Filter auf die Zeitreihen aller Auswerteabschnitte der DMS angewendet.

### 5.6.5 Bewertung der Ergebnisse

Die mit Hilfe eines Kalman-Filters gefilterten Zustandsverläufe der mittleren Spurrinnentiefe lieferten befriedigende Ergebnisse. Für die Anwendung des Kalman-Filters wurde die a priori vorzugebene Systemgleichung anhand einer Parameterstudie optimiert. Die Vorgabe einer mittleren Zustandsänderung sowie der zugehörigen Standardabweichung erfolgte dabei unabhängig von weiteren Randbedingungen. Des Weiteren wurden die Zustandsänderungen zwischen zwei Zeitpunkten näherungsweise als linear sowie zeitinvariant angenommen.

Für eine Abschätzung von annähernd linear verlaufenden Zustandsentwicklungen mit mehreren Messergebnissen kann eine präzise Abschätzung des wahren Zustandsverlaufs anhand der vorgestellten Methodik erfolgen. Lediglich zu Beginn der Zeitreihen, in denen eine ausgeprägte Zunahme der Spurrinnentiefe vorzufinden ist, sind größere Abweichungen zwischen Modell und Wirklichkeit zu beobachten. Im Hinblick auf eine Übertragung der Methode auf andere Zustandsmerkmale mit ausgeprägt nicht-linearen Zustandsverläufen sowie nur wenigen vorliegenden Messergebnissen aus der ZEB ist eine lineare a priori Funktion als nicht mehr geeignet anzusehen. Je besser der gewählte Funktionstyp der a priori Funktion dem wahren Zustandsverlauf entspricht, desto treffender kann diese Zustandsentwicklung abgeschätzt werden. Zusätzlich können entsprechende Erweiterungen des Kalman-Filters auf nicht-lineare Systeme, wie z. B. das Extended Kalman-Filter, das Unscented Kalman-Filter, das Cubature Kalman-Filter oder das Partikelfilter, zu einer verbesserten Abschätzung der Zustandsverläufe beitragen.

Das Kalman-Filter basiert auf der Annahme, dass zwischen den Messergebnissen bzw. den Störgrößen keine zeitlichen und gegenseitigen Korrelationen bestehen und diese ein weißes Rauschen aufweisen [Heunecke 1995]. Eine Korrelation liegt bspw. vor, wenn systematische Fehler in mehreren Messungen, z. B. aufgrund des selben Erfassers, vorhanden sind. In diesem Fall würde die Standardabweichung der Zustandsabschätzung innerhalb des Modells unterschätzt und dadurch die Güte der Filterergebnisse überbewertet werden [Abbeel, Coates, Montemerlo, Ng, Thrun 2005]. Dies kann in Bezug auf die auf der DMS erfassten Zustandsgrößen zum Großteil ausgeschlossen werden (vgl. Tabelle 12).

Die Annahme von standardnormalverteilten Messergebnissen einer Zustandsgröße sollte genauer untersucht werden. Aufgrund der einseitig begrenzten Skalen der Zustandsgrößen sind bei einigen Zustandsmerkmalen keine normalverteilten Fehlerverteilungen zu erwarten. Eine Verletzung der Annahme eines normalverteilten Messrauschens stellt die Anwendung des Kalman-Filters nicht grundsätzlich in Frage. Entscheidend hierbei ist, wie häufig und wie stark die Abweichungen zu einer Normalverteilung zu beobachten sind [Neumann 2002]. Für den Fall einer Verletzung der Voraussetzung einer Normalverteilung können entsprechende Erweiterungen des Modells, wie bspw. das Gaußsche Summenfilter [Garcia 2014] angewendet werden.

---

## 5.7 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die in Kapitel 3 angedeutete Problemstellung zum Umgang mit Messunsicherheiten von Straßenzustandsdaten konkretisiert. Auf Basis der Datengrundlage der DMS erfolgten erste Voruntersuchungen, um den Einfluss einer Feinsynchronisierung, der Länge der Auswerteabschnitte, der Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen, der Verkehrsbelastung und der Bauweise zu analysieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigten, dass der Anteil an gemessenen Zustandsverbesserungen innerhalb eines Zeitraums von vier Jahren trotz der qualitativ hochwertigen Daten nur unwesentlich reduziert werden kann.

Daraufhin erfolgte eine vertiefte Erörterung der Ursachen von gemessenen Zustandsverbesserungen anhand von statistischen Grundlagen und theoretischen Überlegungen. Mit Hilfe einer Simulationsstudie konnte im Anschluss eine Quantifizierung der Einflüsse aus Messpräzision und zeitlichem Abstand zwischen den Erfassungszeitpunkten auf den Anteil an gemessenen Zustandsverbesserungen systematisch untersucht werden. Die Ergebnisse verdeutlichten, dass die dem Prüfverfahren zuzuschreibenden Streuungen die tatsächlich vorhandenen Zustandsänderungen innerhalb eines Zeitintervalls von vier Jahren überdecken.

Um die beschriebene Problemstellung lösen zu können, wurde die Datengrundlage um die kompletten Zeitreihen der Auswerteabschnitte erweitert und ein methodischer Lösungsansatz vorgestellt, der zwischen dem wahren Zustand, dem gemessenen Zustand sowie einem geschätzten Zustand differenziert. Die Parametrisierung des Kalman-Filters erfolgte zunächst auf Basis einer Simulation. Im Anschluss daran wurde das Modell auf die Zustandswerte der DMS angewendet. Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass das Kalman-Filter ein geeignetes Werkzeug darstellt, um Zustandsdaten innerhalb einer Zeitreihe aufzubereiten. Mit diesem können die Streuungen innerhalb einer Zeitreihe eines Auswerteabschnittes reduziert und zugleich die Messunsicherheiten bei den Zustandserfassungen innerhalb des Modells berücksichtigt werden. Dies ermöglicht eine verbesserte Abschätzung des wahren Zustandsverlaufs. Die Methodik der Bayes'schen Statistik ist daher als effiziente Methode zur Datenaufbereitung zu sehen und bietet damit die Grundlage für weitere Untersuchungen und die Entwicklung eines Prognosemodells.

---

## 6 Analyse der Zustandsentwicklung

---

### 6.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird ein Verfahren der längsschnittlichen Strukturgleichungsanalyse auf Straßenzustandsdaten angewendet, um Ursache–Wirkungs-Zusammenhänge zwischen der Zustandsentwicklung einer Fahrbahn und Prädiktoren aufzudecken und statistisch zu überprüfen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden anschließend in die Entwicklung eines Prognosemodells miteinbezogen.

Zu Beginn der Untersuchungen werden Fragestellungen bzw. Arbeitshypothesen aus den Erkenntnissen der Literaturrecherche und theoretischen Überlegungen (vgl. Kapitel 2 und 3) abgeleitet, die einer statistischen Prüfung unterzogen werden. Anschließend wird die für die Anwendung der Modelle notwendige Aufbereitung der Daten vorgestellt. Es werden mehrere Modellvarianten entwickelt und auf die Daten angewendet. Die Ergebnisse dieser Modellvarianten werden vergleichend gegenübergestellt und diskutiert sowie anhand von statistischen Gütekriterien evaluiert. Das Kapitel endet mit einer Methodenkritik und Hinweisen zu potentiellen Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Modellvarianten.

### 6.2 Ableitung von Fragestellungen und Hypothesenbildung

Die Grundlage aller hier formulierten Fragestellungen basiert auf der Annahme, dass sich die Zustandsentwicklung bzw. -änderung eines Oberflächenmerkmals als Funktion in Abhängigkeit verschiedener erklärender Variablen wie folgt formulieren lässt (vgl. hierzu Kapitel 5.6):

Formel 47: Mittlere Zustandsänderung und zugehörige Standardabweichung in Abhängigkeit von exogenen Einflussgrößen, wie z. B. Liegezeit, Verkehrsbelastung, Zustand etc.

$$\Delta\mu, \Delta\sigma = f(\text{Liegezeit}, \text{Verkehrsbelastung}, \text{Zustand}, \dots)$$

Die nachfolgenden Untersuchungen beziehen sich auf die Analyse der Zustandsentwicklung der mittleren Spurrinnentiefe für Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise.

Zwar sind nach Wehner, Siedek und Schulze [1979] bei Betonfahrbahnen ebenfalls verschiedene Verschleißstadien zu beobachten, jedoch fallen diese wesentlich langsamer im Vergleich zu Asphaltdeckschichten aus. Nach Straube und Beckedahl [2000] ist die Bildung von Spurrinnen auf Betonstraßen mittlerweile nur noch sehr selten zu beobachten. Der durch mechanische Beanspruchung hervorgerufene Materialverlust war bis etwa 1975 aufgrund der damals zugelassenen Verwendung von Spikereifen zu beobachten [Eisenmann, Hilmer 1986]. Da der Einsatz solcher Reifen seit Jahren nicht mehr zulässig ist, hat die Problematik der Spurrinnenbildung auf Betonfahrbahnen drastisch an Relevanz verloren und wird daher nur noch selten modelliert [Rübensam, Schulze 1994].

Im Nachfolgenden wird zunächst mit Hilfe der vorgestellten Methodik die Form des Schadensverlaufs des Zustandsmerkmals mittlere Spurrinnentiefe analysiert. Des Weiteren wird der Einfluss der Schwerverkehrsbelastung auf die Zustandsentwicklung untersucht.

---

### 6.2.1 Analyse des Schadensverlaufs

Der zeitliche Verlauf der Spurrinnentiefe kann als Überlagerung von drei Haupteffekten beschrieben werden, die zu einer in der Praxis häufig beobachteten Verhaltenskurve führen. Die Ausprägung dieser drei Anteile aus Nachverdichtung, Schubverformungen und Ermüdung variiert im Wesentlichen in Abhängigkeit von der vorhandenen Asphaltbauweise, der Verkehrsbelastung, den Materialeigenschaften sowie den klimatischen Randbedingungen.

Der vorrangig in den Rollspuren zu beobachtende Effekt der **Nachverdichtung** tritt nur bei Straßenbefestigungen in Asphaltbauweise auf. Hierbei wird das vorliegende Korngerüst in Folge der Verkehrsbelastung nachverdichtet bis sich die Einsenkung auf einen konstanten Wert einstellt. Nach Bartolomaeus [2003] variiert die zeitliche Dauer dieses Nachverdichtungsprozesses in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung zwischen fünf und zehn Jahren. Unebenheiten in Querrichtung bei Fahrbahnen in Betonbauweise innerhalb der frühen Nutzungsphase sind zum Großteil der Einbauqualität geschuldet.

Die zweite Phase der Spurrinnenentwicklung ist durch den Effekt der **Schubverformung** geprägt. Bei Fahrbahnen in Asphaltbauweise kann es aufgrund von schwerverkehrsinduzierten hohen Schubkräften in den Lasträndern zu Verdrängungen und Verschiebungen an der Asphaltschicht kommen [Rosauer 2010]. Zusätzlich können mechanische Beanspruchung und Materialverlust der Fahrbahnoberfläche zu Abrieb führen [Eisenmann, Hilmer 1986]. Beide Effekte lassen sich durch einen linearen Schadensverlauf beschreiben.

Innerhalb der dritten Phase am Ende der Nutzungsdauer einer Fahrbahnbefestigung ist der Effekt der **Materialermüdung** zu beobachten. Hierbei geht der zuvor lineare Schadensverlauf in einen progressiven Zustandsverlauf über. Da meist vor Beginn dieses Schadensmechanismus bereits Erhaltungsmaßnahmen an den betroffenen Straßenabschnitten durchgeführt werden, ist diese letzte Nutzungsphase in der Praxis kaum zu beobachten.

Der qualitative Verlauf einer Spurrinnenentwicklung wird in der Literatur zum Teil gegensätzlich beschrieben. Nach Beobachtungen von Gerlach et al. [1994] verläuft der Zuwachs der Spurrinnentiefe in Abhängigkeit der Anzahl an erfolgten Lastübergängen degressiv. Andere labortechnisch durchgeführten Impulskriechversuche an Asphaltprobekörpern mit einer idealisierten Verkehrsbelastung sowie theoretische Ansätze aus der Asphaltrheologie bestätigten diesen quantitativen Zusammenhang [Bus-eck, Hürtgen 1987]. In den Untersuchungen von Kenis, Sherwood und McMahon [1982], Yandell [1982], Goacolou [1987], Hicks [1988], Sousa, Craus und Monismith [1994] sowie Villaret und Wellner [2002] wurde der Zustandsverlauf der Spurrinnentiefe als linear oder degressiv angenommen. In anderen Untersuchungen durch Hinsch et al. [2005] sowie Oertelt [2007] wurde hingegen ein leicht progressiver Schadensverlauf beobachtet.

Für die DMS ist in der Abbildung 88 der zeitliche Verlauf der gemessenen mittleren Spurrinnentiefen sowie der zugehörige Streubereich anhand der  $2\sigma$ -Umgebung dargestellt, deren Datenbasis die Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen bildet. Über alle Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise der DMS ist eine kontinuierliche Zunahme der mittleren Spurrinnentiefe erkennbar.

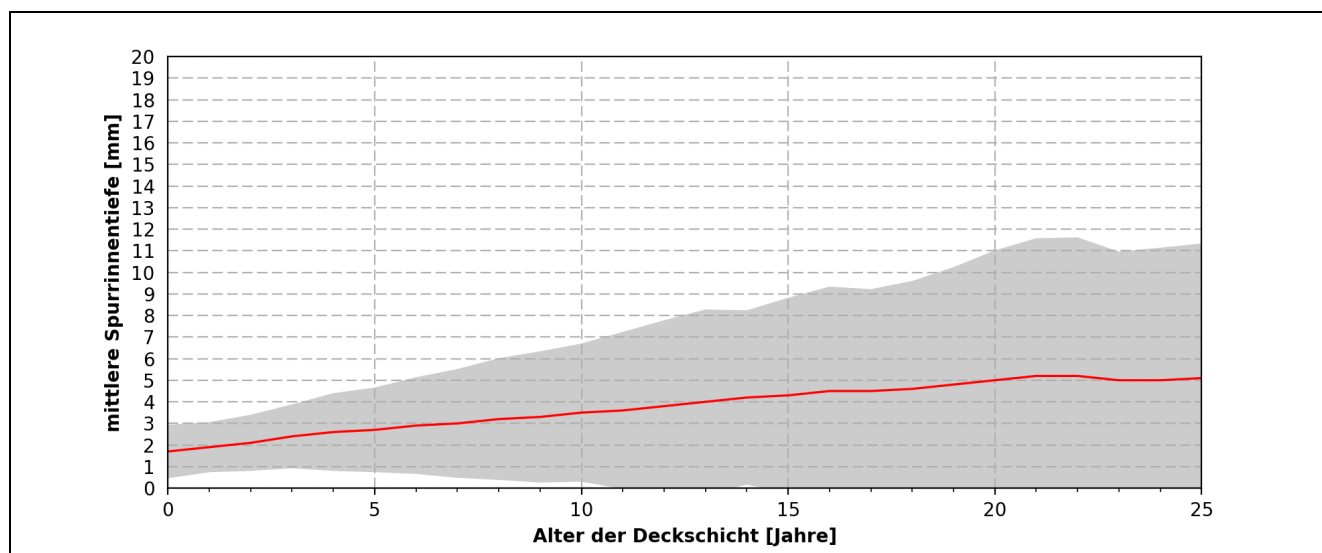


Abbildung 88: Mittlerer Zustandsverlauf der mittleren Spurrinnentiefe für Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise in Abhängigkeit der Liegezeit und 95%-Konfidenzintervall

Der in der Abbildung 88 aufgezeigte Zustandsverlauf soll im Folgenden statistisch analysiert werden. Dazu wird im Rahmen dieser Untersuchung den folgenden Fragestellungen nachgegangen:

- Fragestellung 1a:* Welcher funktionale Zusammenhang eignet sich, um die Zustandsentwicklung der mittleren Spurrinnentiefe abzubilden?
- Fragestellung 1b:* Wie groß ist der mittlere Ausgangszustand und wie stark variiert das Zustandsniveau?
- Fragestellung 1c:* Wie groß ist der mittlere Schadenszuwachs und wie stark variiert dieser?

Dazu werden die folgenden Hypothesen formuliert:

- Hypothese 1a:* Die Zunahme der mittleren Spurrinnentiefe variiert im Laufe der Liegezeit, d. h. es liegt ein nicht-linearer Zusammenhang zwischen Zustand und Liegezeit vor.
- Hypothese 1b:* Der Ausgangszustand der mittleren Spurrinnentiefe hat einen positiven Einfluss auf die zukünftige Schadensentwicklung des Zustandsmerkmals.

## 6.2.2 Einfluss der Verkehrsbelastung

Die Verkehrsbelastung stellt einen der bedeutendsten exogenen Einflussfaktoren zur Vorhersage der Zustandsentwicklung einer Straßenbefestigung dar. Ihr Einfluss variiert in Abhängigkeit vieler weiterer Einflussgrößen, wie z. B. dem Maß, der Anzahl und der Frequenz der Belastung sowie der Dauer einer Einzelbelastung. Aus zahlreichen Untersuchungen ist bekannt, dass vorrangig der Schwerverkehr zu Verformungen und Ermüdung von Asphaltschichten führt [z. B. Lenker 1977; Eisenmann, Hilmer 1986; Rosauer 2010]. Nach Eisenmann und Hilmer [1986] führt eine jährliche Zunahme des Schwerverkehrs bei einer Liegezeit von 20 Jahren bereits zu einer Spurrinnentiefe von 10 mm, wohingegen dieser Zustand bei gleichbleibender Schwerverkehrsbelastung erst nach 50 Jahren erreicht wird.

In der Abbildung 89 sind für die DMS die Zustandsentwicklungen der gemessenen Spurrinnentiefen über alle Auswerteabschnitte in Abhängigkeit der Fahrstreifennummer dargestellt.

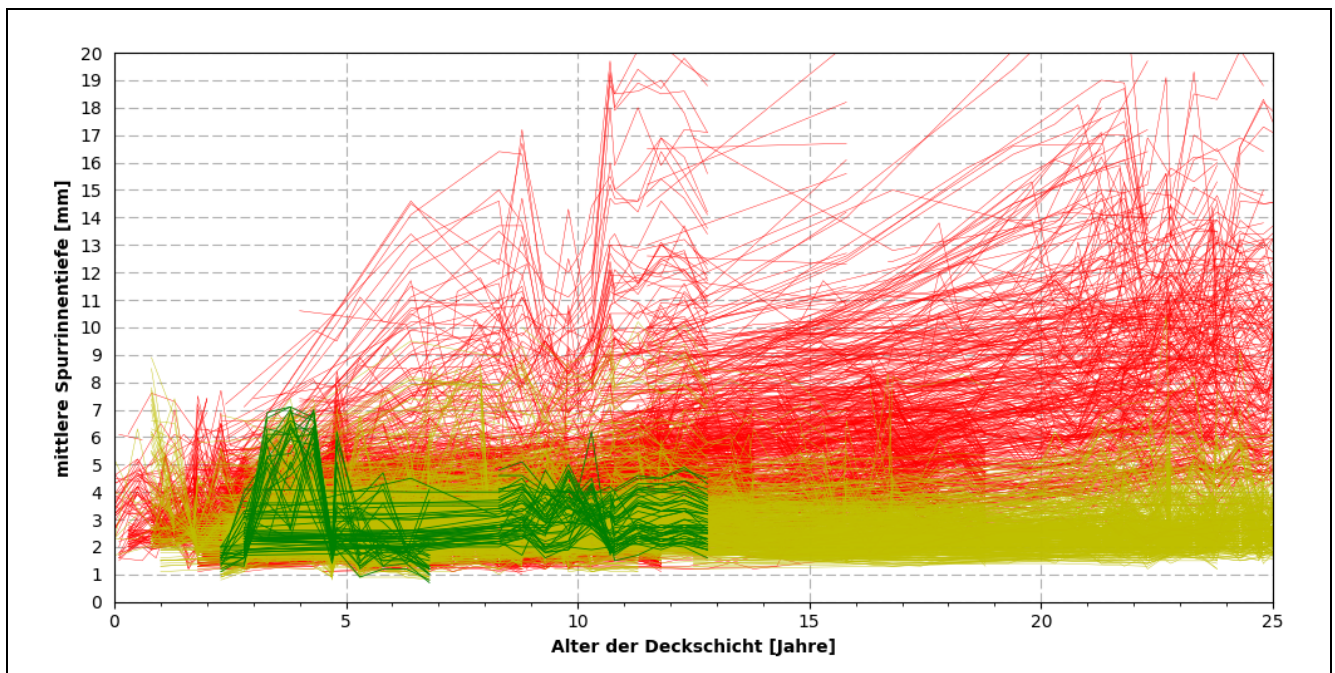


Abbildung 89: Entwicklung der gemessenen mittleren Spurrinnentiefen in Abhängigkeit des Fahrstreifens

Betrachtet man die Zustandsentwicklung der Spurrinnentiefen der Auswerteabschnitte auf der DMS getrennt nach den Fahrstreifen, wird deutlich, dass für die Abschätzung der Zustandsentwicklung eine fahrstreifenbezogene bzw. schwerverkehrsabhängige Differenzierung relevant ist. Zu Beginn der Liegezeit sind nur geringe Unterschiede in der Schadensausprägung zwischen den Fahrstreifen zu beobachten. Auf den Abschnitten des ersten Überholfahrstreifens (FS 2) ist selbst nach einer Liegezeit von 25 Jahren keine Schadenszunahme vorzufinden. Im Gegensatz dazu sind auf dem Hauptfahrstreifen (FS 1) eine deutliche mittlere Zunahme sowie eine große Varianz in der Zustandsentwicklung zu erkennen. Eine Teilmenge dieser Abschnitte zeigt bereits kurz nach Erneuerung einen starken Schadenszuwachs auf.

Um den Einfluss der Schwerverkehrsbelastung analysieren zu können, müssen die über den Querschnitt erfassten Verkehrsbelastungen auf die Fahrstreifen aufgeteilt werden. Es wird folgender Fragestellung nachgegangen:

*Fragestellung 2: Wird die Zustandsentwicklung der mittleren Spurrinnentiefe durch die Schwerverkehrsbelastung beeinflusst?*

Dazu werden die folgenden Hypothesen formuliert:

*Hypothese 2a: Die Schwerverkehrsbelastung hat keinen Einfluss auf den Ausgangszustand zum Zeitpunkt einer Erneuerung bzw. Instandsetzung eines Oberflächenmerkmals. Dies bedeutet, dass innerhalb des ersten Nutzungsjahres die Verformungen im Querprofil unabhängig der Schwerverkehrsbelastung zu beobachten sind.*

---

*Hypothese 2b: Die Schwerverkehrsbelastung hat einen positiven Einfluss auf die Schadensentwicklung eines Oberflächenmerkmals. Fahrbahnoberflächen mit einer größeren Schwerverkehrsbelastung weisen auch eine größere Zunahme der Verformungen im Querprofil auf.*

### **6.3 Entwicklung von Modellvarianten**

In Bezug auf eine Modellierung der Zustandsentwicklung von Fahrbahnoberflächen anhand von latenten Wachstumskurvenmodellen sind zunächst einige Vorüberlegungen und Anforderungen an das Modell zusammenzutragen. Zum einen lassen sich diese aus den in der Literatur enthaltenen Theorien zur Zustandsentwicklung ableiten. Zum anderen ergeben sich aufgrund der gewählten Methode sowie der vorliegenden Datengrundlage Randbedingungen, die bei der Erstellung des Modells Berücksichtigung finden müssen. Zunächst werden die Anforderungen an das zu entwickelnde Modell und der zugehörige verfolgte Lösungsansatz vorgestellt. Die konkrete Umsetzung dieser einzelnen Schritte zur Datenaufbereitung erfolgt im darauffolgenden Abschnitt.

#### **6.3.1 Vorüberlegungen und Anforderungen an ein Modell**

Die Grundstruktur des Modells wird auf Basis der aus der Literaturstudie erarbeiteten Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und der abhängigen Variablen aufgestellt. Es sollen anhand der vorliegenden Daten die zuvor beschriebenen Ursache–Wirkungs-Zusammenhänge überprüft werden. Dies betrifft Zustandsdaten, Verkehrsbelastungsdaten, Aufbaudaten, Querschnittsdaten sowie Daten zu durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen.

Bei der Modellbildung sind mehrere Randbedingungen zu berücksichtigen, die sich aus den Anforderungen latenter Wachstumskurvenmodelle ergeben. Für die Anwendung von latenten Wachstumskurvenmodellen auf die vorliegenden Daten mussten diese zunächst in mehreren Schritten aufbereitet werden.

#### **6.3.2 Datenaufbereitung und Analysevorbereitung**

Die angewendeten Arbeitsschritte im Rahmen der Datenaufbereitung und der Vorbereitung der Analyse werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

##### **1. Auswahl des Analysezeitraums auf Basis der vorliegenden Datengrundlage**

Je nach der Anzahl an vorliegenden Messzeitpunkten und dem Zeitpunkt der zuletzt durchgeführten Erhaltungsmaßnahme liegen je Auswerteabschnitt unterschiedlich lange Zeitreihen vor. Für die Auswahl des Analysezeitraums sind zwei Aspekte von Relevanz. Zum einen soll eine möglichst große Nutzungsdauer der Fahrbahnoberfläche modelliert werden. Die aus der Literatur (z. B. RPE-Stra 01) bekannten Nutzungsdauern von Fahrbahnoberflächen variieren je nach Belastungsklasse und Bauweise stark zwischen 12 und 30 Jahren. Zum anderen ist der Stichprobenumfang je Liegezeit zu berücksichtigen. Nur mit einer ausreichend großen Stichprobenanzahl können die Modellparameter verlässlich geschätzt werden. Um valide Ergebnisse innerhalb von SEM bzw. Wachstumskurvenmodellen zu erhalten, sind bei normalverteilten kontinuierlichen Variablen etwa 100 Messeinträge zu verwenden [Tanaka 1987; Anderson, Gerbing 1988; Hu, Bentler 1999; Finney, DiStefano 2013], wobei die erforderliche Stichprobengröße mit der Komplexität des Modells zunehmend ansteigt [Newsom 2015].

Bei der DMS weisen etwa 80 % ( $N=3.619$ ) aller untersuchten Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise eine beobachtete Liegezeit von bis zu 20 Jahren auf. Die Liegezeit der Fahrbahnoberfläche der restlichen 20 % ( $N=913$ ) aller Auswerteabschnitte variiert zwischen 21 und 40 Jahren (vgl. Abbildung 90).

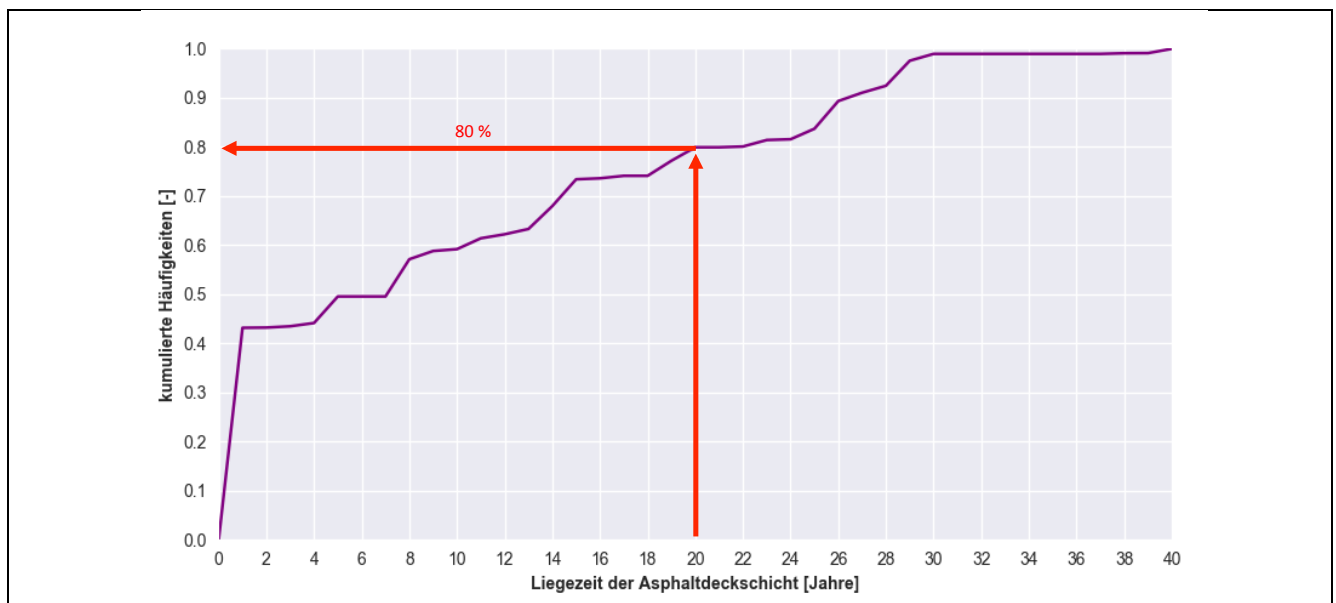


Abbildung 90: Verteilung der Länge der Zeitreihen über alle Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise

Unter Berücksichtigung der beiden zuvor benannten Aspekte wurde als Analysezeitraum eine Zeitspanne von 20 Jahren gewählt, sodass für die folgenden Auswertungen vollständige Zeitreihen von insgesamt 913 Auswerteabschnitten vorliegen. Damit wird die Anforderung der Mindeststichprobenanzahl erfüllt.

## 2. Abbildung nicht-linearer Zustandsverläufe

Der Funktionstyp zur Beschreibung der Zustandsentwicklung einzelner Zustandsmerkmale ist empirisch bisher nicht eindeutig nachweisbar. Aus der Literatur sowie theoretischen Überlegungen lässt sich jedoch der Variationsbereich hinsichtlich möglicher Funktionstypen eingrenzen. Latente Wachstumskurvenmodelle ermöglichen grundsätzlich die Abbildung von beliebigen Wachstumsverläufen und sind daher vielseitig einsetzbar. Dies erfolgt durch die Fixierung der Faktorladungen zwischen den manifesten Variablen und der latenten Wachstumsvariablen. Die Auswahl des Funktionsverlaufs muss jedoch stets theoriegeleitet erfolgen. Das Modell soll die Prüfung unterschiedlicher Funktionstypen ermöglichen. Dazu ist die Anzahl an Messzeitpunkten je Auswerteabschnitt zunächst festzulegen.

## 3. Auswahl der Anzahl an Analysezeitpunkten

Für die Modellierung eines linearen Wachstumsverlaufs sind nach Newsom [2015] mindestens drei Messzeitpunkte heranzuziehen, wobei Fan und Fan [2005] bei diesem Modellansatz auf Konvergenzprobleme bei ca. 25 % aller Elemente der Stichprobe hinweisen. Um solche Konvergenzprobleme zu umgehen, empfehlen diese mindestens fünf Messzeitpunkte bei der Modellierung von nicht-linearen Wachstumsverläufen zu verwenden. Alle Modelle wurden mit jeweils fünf Messzeitpunkten entwickelt, sodass der zeitliche Abstand zwischen zwei (fiktiven) Messzeitpunkten fünf Jahre beträgt.



#### 4. Gleichmäßige Analysezeitpunktabstände

Aufgrund der zusätzlichen halbjährlich durchgeführten Zustandserfassungen auf der DMS variiert der zeitliche Abstand zwischen den Messzeitpunkten. Es liegen Messergebnisse in einem Abstand von einem halben Jahr bis zu mehreren Jahren vor. Für die Anwendung von Wachstumskurvenmodellen können grundsätzlich Daten mit unterschiedlichem Messzeitpunktabstand verwendet werden. Dies setzt jedoch voraus, dass alle Auswerteabschnitte das gleiche Alter aufweisen. Im vorliegenden Fall der Straßenzustandsdaten trifft diese Voraussetzung nicht zu. Um einheitliche Abstände zwischen den Messzeitpunkten dennoch realisieren zu können, wurde der Zustand anhand des mit Hilfe des Kalman-Filters geschätzten Zustandsverlaufs für jedes Jahr interpoliert. Dadurch konnte eine vollständige Zeitreihe mit einheitlichen Messzeitpunktabständen für jeden Auswerteabschnitt generiert werden. Die Abbildung 91 zeigt exemplarisch die anhand des geschätzten Zustandsverlaufs interpolierten Zustände je Liegezeit eines Auswerteabschnittes.

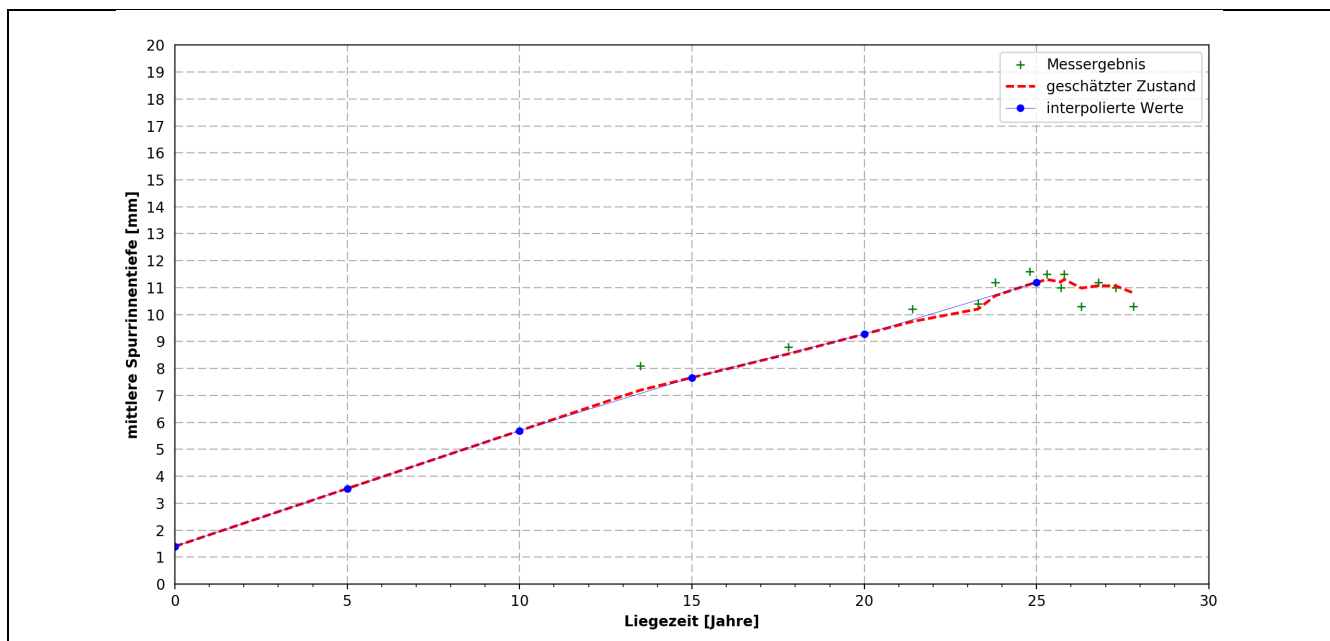


Abbildung 91: Interpolierte Stützwerte des mit Hilfe des Kalman-Filters geschätzten Zustandsverlaufs eines Auswerteabschnittes zu den Liegezeiten 0, 5, 10, 15, 20 und 25 Jahre

Diese aufbereiteten Zeitreihen ermöglichen es, bei der Anwendung von Wachstumskurvenmodellen Auswertungen mit verschiedenen Varianten an Messzeitpunktabständen durchzuführen. Es ist jedoch zu beachten, dass durch die Interpolation von Zwischenwerten ein gewisser Grad an Unschärfe entsteht, der bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

#### 5. Berücksichtigung von Einflussgrößen

Die Berücksichtigung von erklärenden Variablen innerhalb eines latenten Wachstumskurvenmodells kann sowohl anhand von nominal skalierten als auch anhand von metrisch skalierten Prädiktoren erfolgen. Dazu müssen die Regressionsgewichte zwischen Prädiktor und den latenten Wachstumsfaktoren innerhalb des Modells geschätzt werden. Die Anzahl der berücksichtigten Prädiktoren ist grundsätzlich beliebig und nur durch die vorhandene Stichprobengröße bedingt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die erklärende Variable Schwerverkehrsbelastung untersucht.

## 6. Aufbereitung der Daten zur Schwerverkehrsbelastung

Verkehrsdaten, d. h. insbesondere Daten zur Schwerverkehrsbelastung sind eine bedeutende Daten-  
gruppe innerhalb der Straßeninformationssysteme. Als Kenngröße wird meist die durchschnittliche  
tägliche Verkehrsstärke (DTV) verwendet, die in der Regel anhand von Straßenverkehrszählungen  
erhoben wird. Diese Informationen sind bisher meist nur in Form von Querschnittszählungen vorhan-  
den. Eine fahstreifenscharfe Aufteilung der Verkehrsbelastungen ist bisher nur über automatisierte  
Dauerzählstellen möglich. Für eine tiefergehende Auswertung werden jedoch fahstreifenscharfe Daten  
zur Verkehrsbelastung benötigt [Heller et al. 2015]. Da diese Daten jedoch nicht vorliegen, wurde ein  
empirischer Ansatz gewählt, um diese zu ermitteln.

Bei einstreifiger Führung des Verkehrs entspricht die vorliegende Schwerverkehrsbelastung der erfass-  
ten Schwerverkehrsbelastung im Querschnitt. Dieser Fall trifft auf Teile des Bundesstraßennetzes zu,  
jedoch nicht auf Bundesautobahnen. Bei einem zwei- und dreistreifigen Ausbau je Richtungsfahrbahn  
sind die Schwerverkehrsbelastungen auf den Querschnitt zu verteilen. In Anlehnung an die Richtlinien  
für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen wurde die in Tabelle 21 dargestellte Auf-  
teilung gewählt.

Tabelle 21: Verteilung des Schwerverkehrs je Fahstreifen in Abhängigkeit der vorhandenen Fahstreifenanzahl je Fahrtrich-  
tung [in Anlehnung an RStO 2012]

Anzahl an Fahstreifen je Richtungsfahrbahn	Anteil der Schwerverkehrsbelastung		
	Hauptfahstreifen	1. Überholfahstreifen	2. Überholfahstreifen
1	100 %	–	–
2	90 %	10 %	–
3	80 %	18 %	2 %

Die Tabelle 22 zeigt die deskriptive Statistik der Daten zur Schwerverkehrsbelastung nach Anwendung  
des in Tabelle 21 dargestellten Verteilungsschlüssels der Gesamtschwerverkehrsbelastung auf die  
Fahstreifen.

Tabelle 22: Deskriptive Ergebnisse der Schwerverkehrsbelastung

		Fahstreifen			Summe
		1	2	3	
Schwerverkehrsbelastung DTV <sub>sv</sub> [Kfz/24h]	<i>N</i>	1.424	1.318	98	2.840
	<i>M</i>	9.136	1.079	539	5.100
	<i>SD</i>	703	188	21	4.082
	<i>Max</i>	10.130	1.688	563	10.130
	<i>Min</i>	6.560	506	506	506

In der Abbildung 92 ist die Verteilung der Schwerverkehrsbelastung nach Aufteilung auf die Fahstrei-  
fen dargestellt.

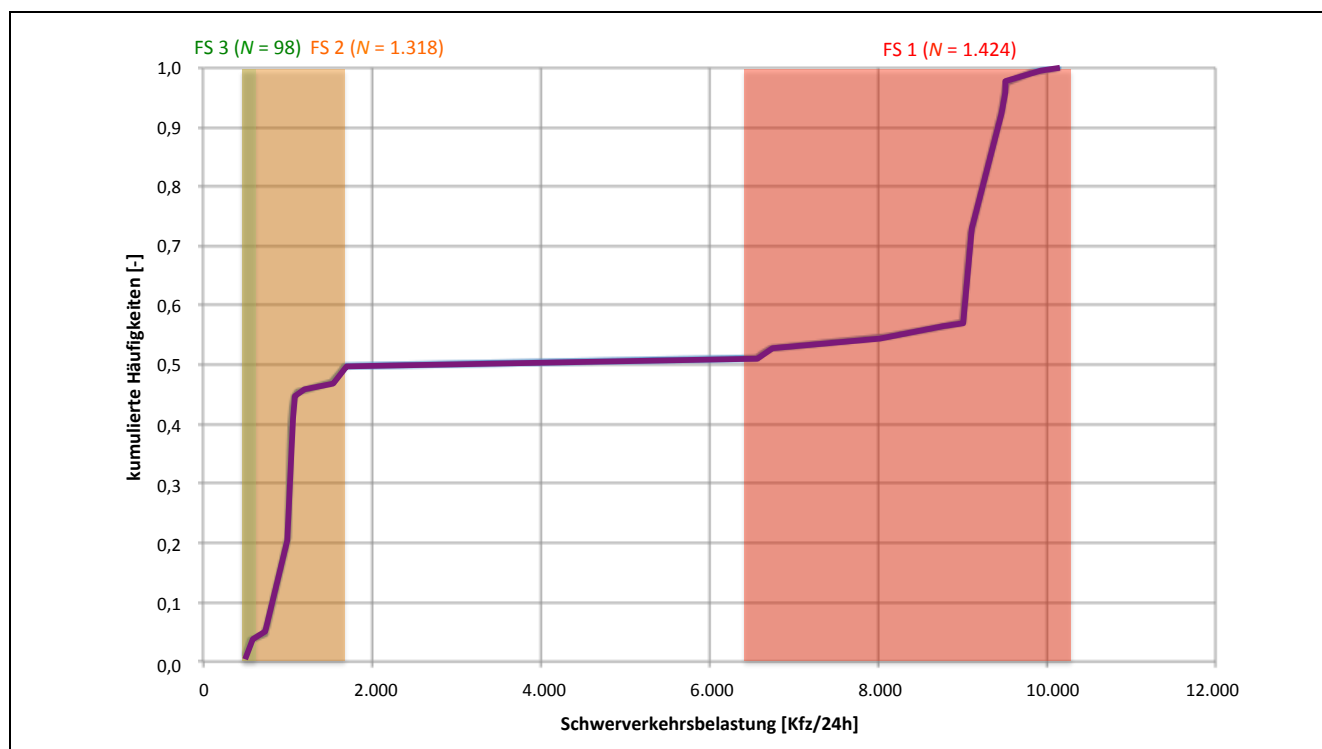


Abbildung 92: Verteilung der Schwerverkehrsbelastung nach Aufteilung auf die Fahrstreifen

## 7. Umgang mit fehlenden Werten

Fehlende Werte in Datensätzen sind in den meisten Studien vorzufinden. Eine der Voraussetzungen für die Anwendung von Wachstumskurvenmodellen ist jedoch das Vorhandensein einer vollständigen Datenmatrix. Das Problem von fehlenden Werten wird insbesondere dann verstärkt, wenn das Fehlen systematisch auftritt und dadurch die Untersuchungsergebnisse nicht brauchbar und systematisch verzerrt sind [Weiber, Mühlhaus 2014]. Eine reduzierte Datenbasis aufgrund von fehlenden Werten führt in der Regel dazu, dass die Effizienz der Parameterschätzungen abnimmt. Zudem können systematische Unterschiede zwischen den beobachteten und fehlenden Werten zu einer Verzerrung in der Parameterschätzung führen [Kline 2016; Lüdtke, Robitzsch, Trautwein, Köller 2007]. In Bezug auf die zu analysierenden Daten liegen fehlende Werte zum Teil in den Aufbaudaten vor. Hier konnte bei 189 Auswerteabschnitten (4,1 %) kein Baujahr ermittelt werden. Bei 178 Auswerteabschnitten (3,9 %) lagen keinerlei Informationen zu dem Deckenmaterial vor. Insgesamt ist die Anzahl an Auswerteabschnitten mit fehlenden Werten jedoch sehr gering. Die Tabelle 23 zeigt die Anzahl an fehlenden Werten je Datengruppe.

Tabelle 23: Anzahl fehlender Werte je Datengruppe

Datengruppe	Anzahl Werte	
	vorhanden	fehlend
Schwerverkehrsbelastung	4.532	0
Fahrstreifennummer	4.532	0
Bauweise	4.530	2
Baujahr	4.343	189
Deckenmaterial	4.354	178

Innerhalb der vorliegenden Untersuchung wurde das innerhalb der Statistiksoftware R Statistics vorhandene Full Information Maximum Likelihood-Verfahren (FIML-Schätzung) angewendet, welches es ermöglicht auch unvollständige Datensätze zu verarbeiten [Arzheimer 2016]. Hierzu werden fehlende Werte innerhalb der Daten anhand aller in der Analyse einbezogener Variablen geschätzt. Die Verwendung alternativer Verfahren zum Umgang mit fehlenden Daten, wie bspw. eine multiple Imputation, sollte im Rahmen von weiteren Studien geprüft werden. Nachdem die Datengrundlage aufbereitet wurde, konnte mit der Modellierung von Modellvarianten begonnen werden. Diese werden im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt.

### 6.3.3 Modellvariante A

Das erste Modell stellt die einfachste Variante zur Modellierung der Schadenszunahme einer Fahrbahnoberfläche dar. Es ist als Grundlage für weitere detailliertere Modellvarianten zu sehen. Dieses Modell beinhaltet zwei latente Konstrukte, anhand derer der Schadensverlauf modelliert wird. Der Intercept spiegelt den Eingangswert einer Schadensentwicklung bei einer Liegezeit von 0 Jahren wider. Die Faktorladungen des Intercept-Faktors sind für alle Messzeitpunkte einheitlich auf 1 fixiert. Die vermutete Abhängigkeit des Zustandsniveaus von der vorherrschenden Verkehrsbelastung wird als linearer Zuwachs modelliert. Hierzu wurden die Faktorladungen des Slope-Faktors auf die Werte 0, 1, 2, 3 und 4 festgesetzt. Der Schadenszuwachs beginnt erst zum zweiten Messzeitpunkt, sodass zum ersten Messzeitpunkt die Faktorladung auf 0 gesetzt wurde. Die bei der Zustandserfassung vorherrschenden Messfehler je Messzeitpunkt werden anhand des Fehlerterms  $\varepsilon$  modelliert, welche ebenfalls einen Einfluss auf die beobachtete Variable je Messzeitpunkt haben. In Abbildung 93 ist die Struktur des beschriebenen Modells dargestellt.

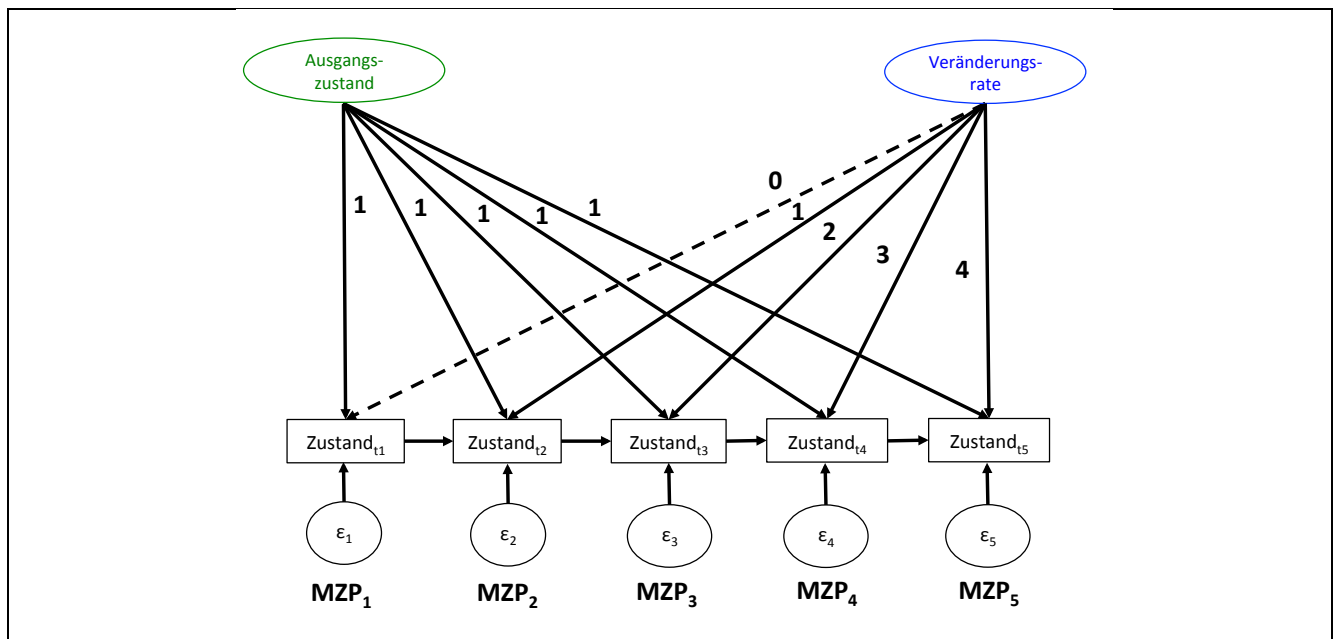


Abbildung 93: Modellstruktur von Variante A

### 6.3.4 Modellvariante B

Das zweite Modell beinhaltet die Grundstruktur aus Modell A. Zusätzlich zu einem linearen Schadenszuwachs wurde eine quadratische Veränderungsrate ergänzt, sodass insgesamt ein quadratischer Schadensverlauf abgebildet wird. Die Verwendung sowohl einer linearen als auch einer quadratischen Veränderungsrate ermöglicht die Abbildung, je nach gewählten Faktorladungen, von progressiven bzw. degressiven Zustandsverläufen. Der Intercept beschreibt den Eingangswert zum Messzeitpunkt 1. Die lineare Veränderungsrate beschreibt die Parabel-Tangente für  $t = 0$  und gibt somit die Steigung des quadratischen Zustandsverlaufs zum Messzeitpunkt 1 wieder. Mit Hilfe der quadratischen Veränderungsrate kann ein degressiver Zustandsverlauf modelliert werden. Dies impliziert, dass mit zunehmender Liegezeit der Schadenszuwachs geringer wird.

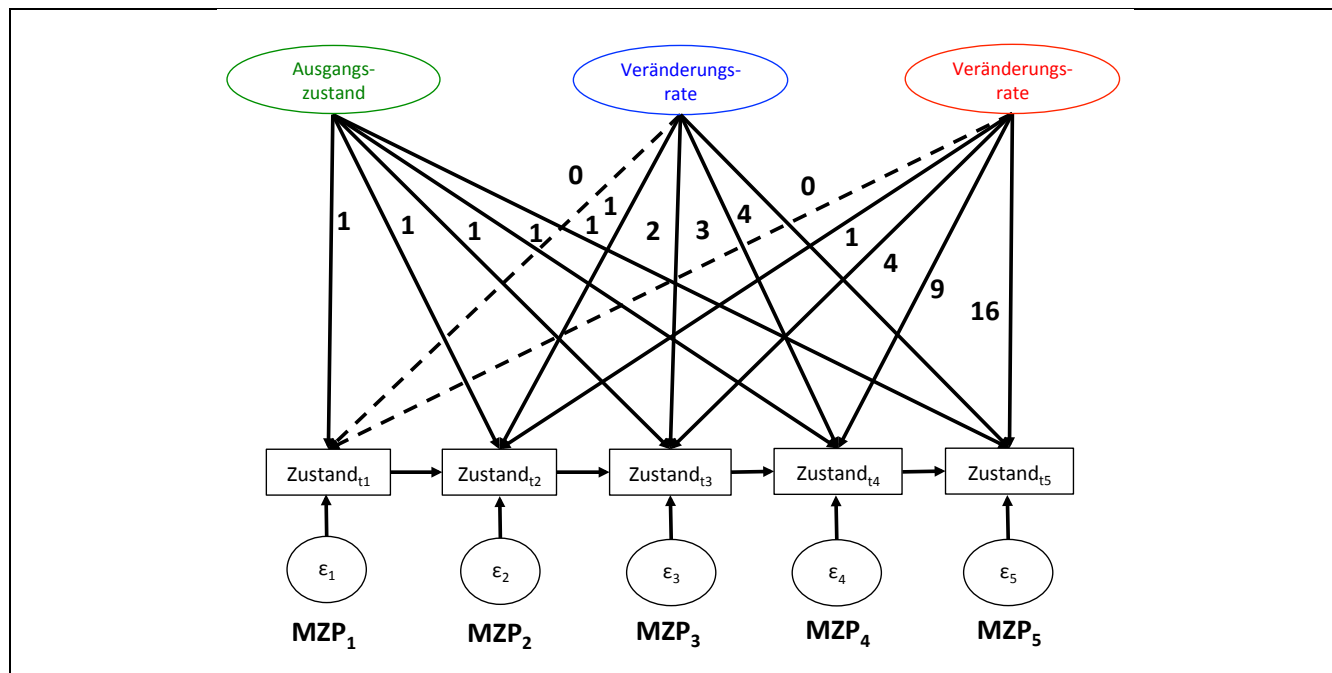


Abbildung 94: Modellstruktur von Variante B

Sowohl die Faktorladung des linearen Slopes als auch die des quadratischen Slopes auf den Zustand zum Messzeitpunkt 1 wurden auf 0 gesetzt, sodass der Schadenszuwachs zum Messzeitpunkt 2 beginnt.

### 6.3.5 Modellvariante C

Das Modell C basiert im Wesentlichen auf der Konfiguration von Modell B. Es beinhaltet zwei Belastungsfaktoren, die auf die Zustände wirken. Zusätzlich wurde dieses Modell um die zeitstabile und fahrstreifenspezifische Kovariate Schwerverkehrsbelastung ( $DTV_{SV}$ ) erweitert, welche auf den Ausgangswert und beide Faktoren der Veränderungsrate lädt. Die zugehörige Modellstruktur ist in der Abbildung 95 dargestellt.

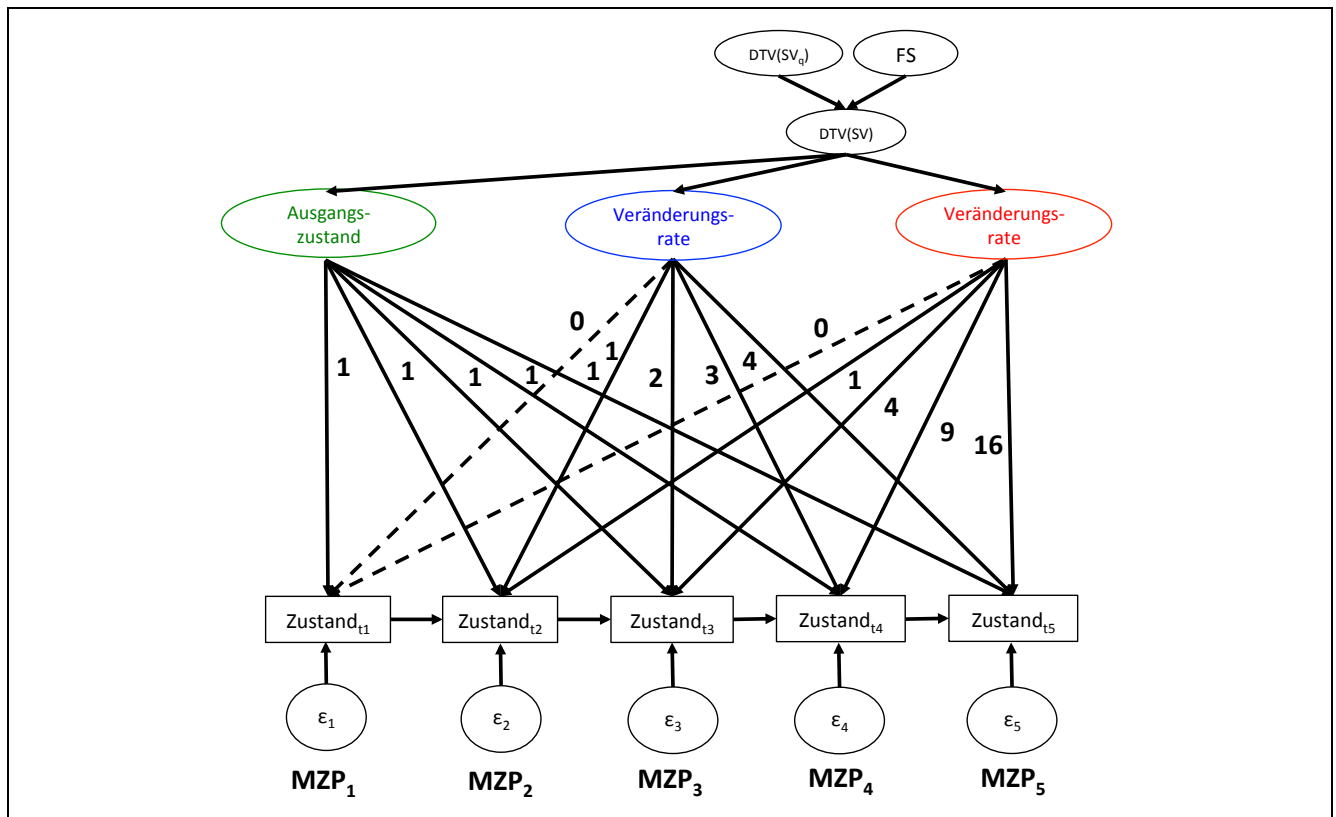


Abbildung 95: Modellstruktur von Variante C

## 6.4 Anwendung der Methode, Ergebnisse und Evaluation der Modellvarianten

Die Berechnung der Ergebnisse aller Modellvarianten erfolgte unter Anwendung der Statistiksoftware R (Version 1.0.153). Als Paket wurde lavaan verwendet [Rosseel 2012]. Die ermittelten Ergebnisse der Fit-Indizes werden sowohl für gewöhnliche Schätzungen (unkorrigierte Schätzung), als auch unter Berücksichtigung der Korrektur von nicht normalverteilten Daten (robuste Schätzung) angegeben. Die ausführlichen Berechnungsergebnisse je Modellvariante sind im Anhang A4 enthalten.

### 6.4.1 Plausibilitätsprüfung, Parameterschätzung und Prüfung der Gesamtgüte

Die Prüfung der Gesamtgüte aller Modellvarianten wird anhand der vorgestellten inferenzstatistischen Gütekriterien durchgeführt. Des Weiteren werden die deskriptiven, absoluten Gütekriterien verwendet, die im Wesentlichen auf Erfahrungswerten für Fit-Indices aus Simulationsstudien beruhen.

---

## Modell A

Die Modellvariante A mit einer linearen Veränderungsrate lieferte als robustes Ergebnis des  $\chi^2$ -Tests einen Wert von  $\chi^2 = 285.229$ ,  $df = 11$ ,  $p \leq .001$ . Der CFI als auch der TLI liegen mit jeweils 0.923 in der unkorrigierten Variante und mit 0.945 in der robusten, korrigierten Variante in einem akzeptablen Bereich. Der RMSEA lieferte einen Wert in der unkorrigierten Variante von 0.093 bzw. in der korrigierten Variante von 0.130. Beide Varianten sind als mittelmäßig bzw. inakzeptable Modell-Fits zu bewerten. Der SRMR liegt mit einem Wert von 0.091 in beiden Varianten knapp unterhalb von 0.10 und ist damit noch als akzeptabel zu bewerten.

## Modell B

Die um einen quadratischen Wachstumsslope erweiterte Modellvariante B lieferte als robustes Ergebnis des  $\chi^2$ -Tests  $\chi^2 = 72.560$ ,  $df = 10$ ,  $p \leq .001$ . Die Modellvariante B lieferte einen CFI von 0.981 in der unkorrigierten Variante bzw. 0.989 in der robusten Variante. Dies kann in beiden Varianten als sehr guter Modell-Fit bewertet werden. Die berechneten TLI lagen bei der unkorrigierten Variante bei 0.974 und bei der robusten Variante bei 0.984, sodass dies ebenfalls als sehr guter Modell-Fit bewertet wird. Der RMSEA liegt für Modellvariante B bei 0.057 bzw. 0.073. In beiden gerechneten Varianten kann dies als akzeptabler Modell-Fit bewertet werden. Der kritische Schwellenwert für das Gütekriterium SRMR von einem Wert kleiner gleich 0.10 wurde in beiden Varianten mit 0.042 eingehalten und kann somit als guter Model-Fit bewertet werden.

## Modell C

Die Modellvariante C mit der fahrstreifenbezogenen Schwerverkehrsbelastung als zusätzlichen Prädiktor lieferte als robustes Ergebnis des  $\chi^2$ -Tests  $\chi^2 = 75.726$ ,  $df = 15$ ,  $p \leq .001$ . Diese Modellvariante lieferte einen CFI von 0.986 in der unkorrigierten Variante bzw. 0.991 in der robusten Variante. Dies kann in der unkorrigierten Variante als sehr guter und in der robusten Variante als hervorragender Modell-Fit bewertet werden. Die berechneten TLI lagen bei der unkorrigierten Variante bei 0.977 und bei der robusten Variante bei 0.984, sodass dies ebenfalls als sehr guter Modell-Fit bewertet wird. Der RMSEA liegt für Modellvariante C bei 0.051 bzw. 0.062. Sowohl in der unkorrigierten als auch in der robust gerechneten Variante kann dies als akzeptabler Modell-Fit bewertet werden. Der kritische Schwellenwert für das Gütekriterium SRMR von einem Wert kleiner gleich 0.10 wurde in beiden Varianten mit 0.023 deutlich eingehalten und wird mit einem guten Model-Fit bewertet.






### 6.4.2 Vergleich der Modelle untereinander

In der Tabelle 24 sind die berechneten Fit-Indices je Modellvariante zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 24: Übersicht der Ergebnisse aus den Modellvarianten A bis C

		Modellvariante		
		A	B	C
Anzahl MZP		5	5	5
Variablenmodellierung		manifest	manifest	manifest
Angenommener Wachstumskurvenverlauf		linear	quadratisch	quadratisch
Prädiktoren		–	–	Schwerverkehr
$\chi^2$ -Test	unkorrigiert	552.689	117.757	118.366
	robust	285.229	72.560	84.605
df		11	7	9
$p(\chi^2)$		0.000	0.000	0.000
CFI	unkorrigiert	0.945	0.989	0.989
	robust	0.923	0.981	0.984
TLI	unkorrigiert	0.950	0.984	0.982
	robust	0.930	0.974	0.974
RMSEA	unkorrigiert	0.131	0.073	0.065
	robust	0.093	0.058	0.054
SRMR	unkorrigiert	0.091	0.042	0.023
	robust	0.091	0.042	0.023

Bewertungsmaßstäbe der Gütekriterien zur Bewertung des Modell-Fits:

CFI		hervorragend		sehr gut		akzeptabel		mittelmäßig		schlecht
TLI		hervorragend		sehr gut		akzeptabel		mittelmäßig		schlecht
RMSEA		sehr gut		gut		akzeptabel		mittelmäßig		inakzeptabel
SRMR		sehr gut		gut		akzeptabel				schlecht



## 6.5 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

In diesem Abschnitt erfolgt die Interpretation und Diskussion der berechneten Ergebnisse. Dazu werden die in Bezug auf das zuvor formulierte Kausalmodell berechneten Ergebnisse mit dem Zweck vorgestellt, die zuvor aufgestellten Hypothesen empirisch zu bestätigen oder gegebenenfalls zu verwerfen.

### 6.5.1 Prüfung der Kausalhypothesen und Analyse kausaler Effekte

Die Überprüfung der Kausalhypothesen anhand der Ergebnisse wird für jede Forschungsfrage abschnittsweise vorgestellt. Zunächst erfolgt eine Darstellung der Ergebnisse in Bezug auf den funktionellen Zusammenhang zwischen Liegezeit und Zustand. Anschließend werden die Ergebnisse zur zweiten Forschungsfrage im Hinblick auf den Einfluss der Schwerverkehrsbelastung vorgestellt.

#### Fragestellung 1: Analyse des Schadensverlaufs

Zu Beginn wurde untersucht, welcher Schadensverlauf den funktionalen Zusammenhang zwischen der Liegezeit und der Zustandsgröße MSPT treffend abbildet. In Tabelle 25 und Abbildung 96 ist dazu die Verteilung der Spurrinnentiefe zu den Messzeitpunkten 0, 5, 10, 15 und 20 Jahren dargestellt. Die grau schattierte Fläche zeigt die  $2\sigma$ -Umgebung um den Mittelwert.

Tabelle 25: Deskriptive Ergebnisse der Spurrinnentiefe in Abhängigkeit der Liegezeit

		Liegezeit [Jahre]				
		0	5	10	15	20
MSPT [mm]	<i>N</i>	960	960	960	960	960
	<i>M</i>	1,7	2,9	3,7	4,4	5,1
	<i>SD</i>	0,3	1,1	1,7	2,3	3,0
	<i>Max</i>	7,2	9,3	13,2	17,5	18,9
	<i>Min</i>	0,0	0,7	0,9	0,9	0,9

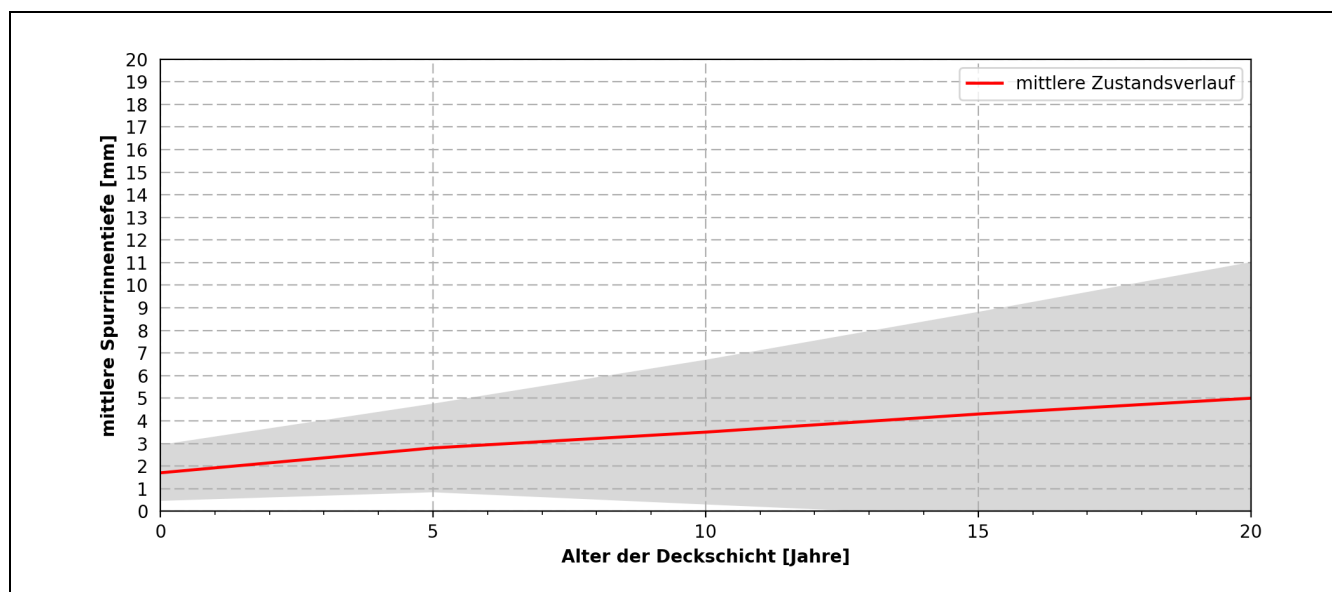


Abbildung 96: Mittelwerte der Spurrinnentiefe in Abhängigkeit der Liegezeit

---

## Modell A

Der Ausgangswert in Modell A, d. h. die mittlere Spurrinnentiefe zu Messzeitpunkt 0, beträgt 1,708 mm ( $SE = 0,013$ ,  $p \leq 0,001$ ). Die zugehörige Varianz liegt bei  $0,254 \text{ mm}^2$  ( $SE = 0,018$ ,  $p \leq 0,001$ ), sodass signifikante Unterschiede in der mittleren Spurrinnentiefe zu Beginn der Liegezeit zwischen den Auswerteabschnitten vorliegen. Der mittlere lineare Schadenszuwachs innerhalb einer Zeitspanne von fünf Jahren beträgt 1,140 mm ( $SE = 0,019$ ,  $p \leq 0,001$ ) mit einer zugehörigen Varianz von  $0,742 \text{ mm}^2$  ( $SE = 0,039$ ,  $p \leq 0,001$ ), sodass signifikante Unterschiede in der Entwicklung der mittleren Spurrinnentiefe zwischen den einzelnen Auswerteabschnitten vorliegen. Die Kovarianz zwischen Ausgangswert und Veränderungsrate weist einen geringen, jedoch signifikanten Zusammenhang auf ( $-0,057$ ,  $SE = 0,018$ ,  $p \leq 0,01$ ). Dieser negative Zusammenhang kann dahingehend interpretiert werden, dass Straßenabschnitte, die bereits zu Beginn ihrer Liegezeit eine vergleichsweise hohe Spurrinnentiefe aufweisen, im Laufe der Zeit eine geringere Schadenszunahme aufweisen (Hypothese 1b).

## Modell B

Die Modellvariante B lieferte einen Ausgangswert von 1,685 mm ( $SE = 0,012$ ,  $p \leq 0,001$ ) mit einer zugehörigen Varianz von  $0,320 \text{ mm}^2$  ( $SE = 0,028$ ,  $p \leq 0,001$ ). Dies bedeutet, dass, analog zu Modellvariante A, signifikante Unterschiede bei den Ausgangswerten der mittleren Spurrinnentiefen zwischen den Auswerteabschnitten vorliegen. Der lineare Anteil der Schadenszunahme beträgt 1,226 mm ( $SE = 0,026$ ,  $p \leq 0,001$ ) mit einer vergleichsweise großen Varianz von  $1,221 \text{ mm}^2$  ( $SE = 0,077$ ,  $p \leq 0,001$ ). Dies ist dahingehend zu interpretieren, dass die Entwicklung der mittleren Spurrinnentiefe zwischen den Auswerteabschnitten variiert. Der zusätzliche quadratische Anteil fällt vergleichsweise klein mit einem Wert von  $-0,049 \text{ mm}$  ( $SE = 0,006$ ,  $p \leq 0,001$ ) und einer Varianz von  $0,033 \text{ mm}^2$  ( $SE = 0,004$ ,  $p \leq 0,001$ ) aus.

Im Vergleich zu Modell A fällt der Zusammenhang zwischen Ausgangswert und linearer Veränderungsrate größer aus (Kovarianz =  $-0,183$ ,  $SE = 0,032$ ,  $p \leq 0,001$ ). Dies ist aufgrund einer genaueren Spezifizierung des Wachstumsverlaufs durch die Hinzunahme eines quadratischen Slopes zu erklären. Hierdurch kann der Zusammenhang zwischen dem Ausgangswert der mittleren Spurrinnentiefe und der linearen Schadensentwicklung sowie dem Zusammenhang zwischen dem Ausgangswert und dem quadratischen Anteil der Schadensentwicklung unterschieden werden, wodurch eine differenziertere Schätzung möglich ist. So zeigt sich ein geringer, positiver Zusammenhang zwischen dem Ausgangswert und dem quadratischem Slope mit einer Kovarianz von  $0,021$  ( $SE = 0,006$ ,  $p \leq 0,001$ ). Dies bedeutet, dass das Abflachen der Wachstumskurve für Auswerteabschnitte, die bereits zu Beginn eine höhere mittlere Spurrinnentiefe aufweisen, stärker ausgeprägt ist (Hypothese 1b). Zusätzlich weist der lineare Slope einen negativen Zusammenhang mit dem quadratischen Slope auf (Kovarianz =  $-0,139$ ,  $SE = 0,016$ ,  $p \leq 0,001$ ). Ein steilerer linearer Anstieg in der Schadensentwicklung geht somit mit einer stärkeren Abflachung des Verlaufs einher (Hypothese 1a).

### *Fragestellung 2: Einfluss der Schwerverkehrsbelastung*

Im Rahmen der zweiten Fragestellung wurde untersucht, welchen Einfluss die Anzahl an Kraftfahrzeugen des Schwerverkehrs auf die Zustandsentwicklung der mittleren Spurrinnentiefe hat. In der nachfolgenden Abbildung 97 sind die mittleren Zustandsverläufe der Spurrinnentiefe getrennt nach der Schwerverkehrsbelastung dargestellt.

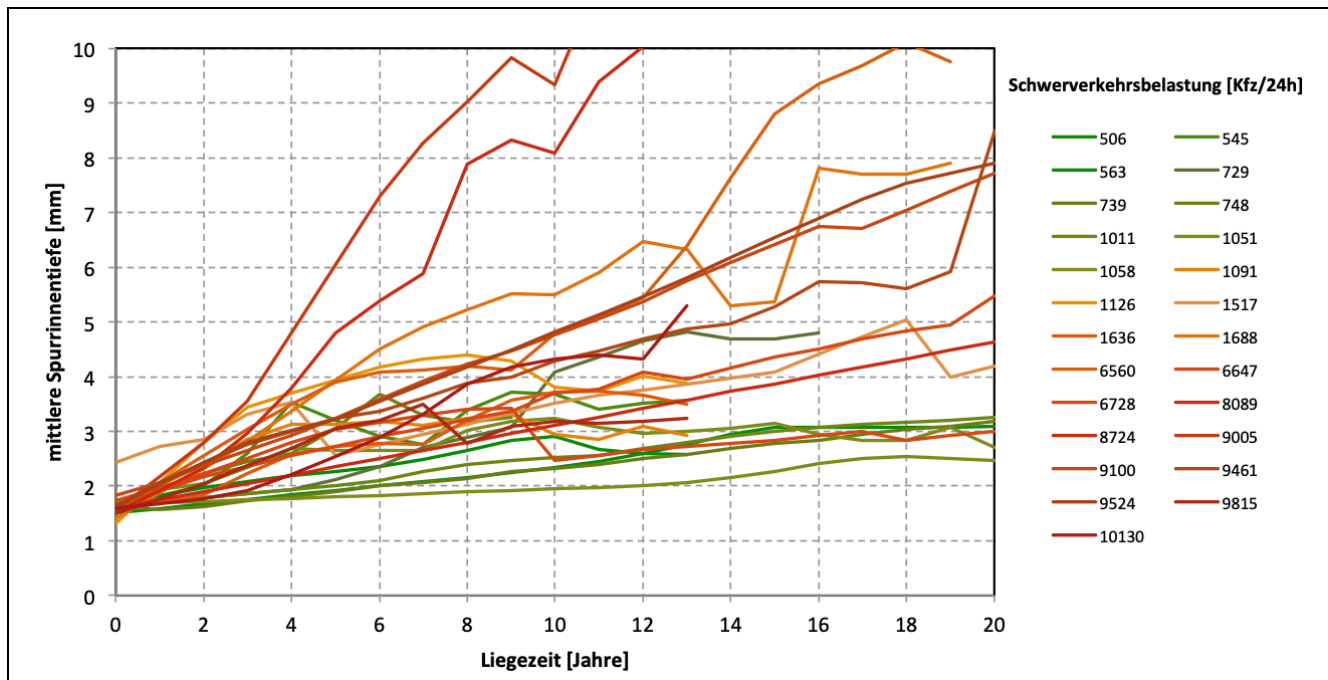


Abbildung 97: Mittelwerte der Spurrinnentiefe in Abhängigkeit der Schwerverkehrsbelastung und der Liegezeit

Für die Auswerteabschnitte des Hauptfahrstreifens (rot) ist ein annähernd linearer Zustandsverlauf innerhalb einer Liegezeit von 20 Jahren festzustellen. Vergleichend dazu, weisen die Auswerteabschnitte der beiden Überholfahrstreifen (orange und grün) einen degressiven Zustandsverlauf auf, der bei einer mittleren Spurrinnentiefe von ca. 3 mm stagniert. Die zugehörigen Streubereiche liegen zum Zeitpunkt von 0 Jahren bei allen Fahrstreifen bei einer Standardabweichung zwischen 0,5 mm und 0,7 mm. Nach einer Liegezeit von 20 Jahren hingegen beträgt die Standardabweichung des Hauptfahrstreifens 3,0 mm, wohingegen die Standardabweichungen der mittleren Spurrinnentiefen auf den Überholfahrstreifen bei 0,9 mm bzw. 0,4 mm liegen.

### Modell C

Bei einer Liegezeit von 0 Jahren weisen erwartungsgemäß alle Auswerteabschnitte eine ähnliche mittlere Spurrinnentiefe von 1,674 mm ( $SE = 0,018$ ,  $p \leq 0,001$ ) mit einer Varianz von  $0,314 \text{ mm}^2$  ( $SE = 0,028$ ,  $p \leq 0,001$ ) auf. Der lineare Anteil der Schadenszunahme beträgt nun ca. 0,792 mm ( $SE = 0,031$ ,  $p \leq 0,001$ ) mit einer zugehörigen Varianz von  $1,099 \text{ mm}^2$  ( $SE = 0,070$ ,  $p \leq 0,001$ ). Der zusätzliche quadratische Anteil fällt analog zu Modellvariante B vergleichsweise klein mit einem Wert von  $-0,078 \text{ mm}$  ( $SE = 0,007$ ,  $p \leq 0,001$ ) und einer Varianz von  $0,034$  ( $SE = 0,004$ ,  $p \leq 0,001$ ) aus. Sowohl der lineare als auch der quadratische Anteil weisen signifikante Unterschiede zwischen den Auswerteabschnitten auf. Die Kovarianz zwischen dem Ausgangswert und der linearen Veränderungsrate beträgt  $-0,182 \text{ mm}^2$  ( $SE = 0,018$ ,  $p \leq 0,001$ ), zwischen dem Ausgangswert und dem quadratischen Anteil der Veränderungsrate  $0,022 \text{ mm}^2$  ( $SE = 0,006$ ,  $p \leq 0,001$ ) und zwischen linearen der linearen und der quadratischen Veränderungsrate  $-0,154 \text{ mm}^2$ ,  $SE = 0,014$ ,  $p \leq 0,001$ ).

Die Ergänzung der Schwerverkehrsbelastung als zusätzlichen Prädiktor in das Wachstumskurvenmodell zeigt, dass die Schwerverkehrsbelastung mit einem Regressionsgewicht von  $B = 0,002$  ( $SE = 0,003$ ,  $p = 0,468$ ) keinen signifikanten Einfluss auf den Ausgangswert der mittleren Spurrinnentiefe hat (Hypothese 2a). Erwartungsgemäß erklärt die Schwerverkehrsbelastung keine Varianz in den

---

Unterschieden der Ausgangswerte in der mittleren Spurrinnentiefe zwischen den Auswerteabschnitten ( $R^2 = 0,00$ ). Im Vergleich dazu weist die Schwerverkehrsbelastung jedoch einen signifikant positiven Einfluss auf den linearen Anstieg ( $B = 0,089$ ,  $SE = 0,006$ ,  $p \leq 0,001$ ) auf. Dieser Prädiktor kann 10,7 % der Varianz der linearen Veränderungsrate erklären. Auswerteabschnitte mit einer höheren Schwerverkehrsbelastung, weisen auch einen steileren Anstieg im Verlauf der mittleren Spurrinnentiefe auf (Hypothese 2b). Für den quadratischen Wachstumsfaktor zeigt sich ein signifikant positiver, jedoch geringer Einfluss der Schwerverkehrsbelastung ( $B = 0,005$ ,  $SE = 0,001$ ,  $p \leq 0,001$ ). Je höher die Verkehrsbelastung, desto geringer die Abflachung der Kurve. Diese kann lediglich 1,20 % der Varianz des quadratischen Slopes erklären.

### **6.5.2 Methodenkritik**

Die angewendete Methodik ermöglichte es, die zuvor aufgestellten Arbeitshypothesen einer statistischen Prüfung zu unterziehen, um sowohl Aussagen zum Schadensverlauf eines Zustandsmerkmals treffen als auch damit verbundene Einflussgrößen identifizieren zu können. Obwohl die Ergebnisse vielversprechend sind, mussten für die Anwendung der Methodik einige Annahmen getroffen werden, die zukünftig in weiteren Studien zu validieren sind oder ggf. durch alternative Ansätze berücksichtigt werden können. Einige dieser Punkte werden im Folgenden erläutert.

#### **Stichprobenumfang**

Die Anwendung von Wachstumskurvenmodellen erfordert für die Berechnung von validen Ergebnissen eine Mindestgröße des Stichprobenumfangs. In der Literatur wird in der Regel ein Stichprobenumfang des Fünffachen der Anzahl an zu schätzenden Parametern gefordert [vgl. Boomsma 1983, Loehlin 1987]. Für SEM wird oftmals die in Chin [1998] angegebene Anzahl des 10-fachen des Maximums der Zahl an Indikatoren und der maximalen Anzahl an Regressionspfaden als Richtwert empfohlen [Weiber, Mühlhaus 2014]. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung mit einer Gesamtanzahl von mehr als 900 Auswerteabschnitten wurden diese Anforderungen deutlich erfüllt.

#### **Annahme von Normalverteilung**

Die Mehrheit aller statistischen Prüfverfahren basiert auf der Annahme normalverteilter Daten. Da dies nach Steinmetz [2015] oftmals und insbesondere für Straßenzustandsdaten nicht der Fall ist [Socina 2007], muss für die Anwendung solcher statistischen Verfahren die Datengrundlage ggf. in eine normalverteilte Stichprobe konvertiert werden. In Bezug auf den innerhalb von Strukturgleichungsmodellen verwendeten  $\chi^2$ -Test wird der  $\chi^2$ -Wert meist überhöht und die Standardfehler der Parameter unterschätzt [Finney, DiStefano 2006]. Eine Korrektur der  $\chi^2$ -Statistik und die Schätzung robuster Standardfehler wurde in der vorliegenden Untersuchung mit Hilfe einer robusten Maximum Likelihood-Methode umgesetzt, welche innerhalb von R verfügbar ist. Alternative Verfahren zum Umgang mit nicht normalverteilten Daten innerhalb von querschnittlichen SEM wurden in den vergangenen Jahren entwickelt. Die Erweiterung auf längsschnittliche SEM, wie bspw. latente Wachstumskurvenmodelle, ist bisher jedoch kaum untersucht [Brandt 2013].

---

## Gleichmäßige Messzeitpunktabstände

Für die Anwendung von latenten Wachstumskurvenmodellen müssen die Messzeitpunkte je Merkmal in gleichen Abständen zueinander liegen. Anderenfalls können die Faktorladungen der Veränderungsrate modifiziert werden. Die routinemäßig durchgeführten ZEB-Kampagnen alle vier Jahre erfüllen diese Voraussetzung. Im Falle der DMS lagen jedoch Messergebnisse in unterschiedlich großen Zeitabständen zueinander vor. Eine Modifizierung der Faktorladungen war jedoch nicht möglich, da das Alter der Auswerteabschnitte zum Zeitpunkt der Messungen unterschiedlich war. Daher wurde die in Kapitel 5.6.2 vorgestellte Methodik der Datenaufbereitung mittels Kalman-Filter und Interpolation von Stützstellen angewendet. Hierdurch entstehen Ungenauigkeiten für die an den Stützstellen geschätzten Zustandsausprägungen, die den Modell-Fit beeinflussen können. Trotz dieser Ungenauigkeiten in der Anpassung an den „wahren“ Zustandsverlauf waren die Fit-Werte der Modellvarianten zufriedenstellend. Im Hinblick auf eine zukünftige Anwendung auf Straßenzustandsdaten der regelmäßig durchgeführten ZEB-Kampagnen entfällt die Problematik von nicht gleichmäßigen Zeitabständen zwischen den Messzeitpunkten. Allerdings besteht auch hier weiterhin die Problematik, dass das Alter der Auswerteabschnitte variiert. Für eine optimale Anwendung der Methode müssten jeweils nur Auswerteabschnitte gleicher Liegezeit in die Auswertung einbezogen werden, wodurch sich jedoch die Stichprobengröße deutlich reduziert. Anderenfalls wird empfohlen, die in dieser Arbeit durchgeführte Interpolation der Zustandswerte anzuwenden.

## 6.6 Kapitelzusammenfassung

Dieses Kapitel beinhaltet die Anwendung von latenten Wachstumskurvenmodellen auf Straßenzustandsdaten der DMS. Ziel dieser Untersuchung war die Analyse des Schadensverlaufs der Zustandsgröße mittlere Spurrinnentiefe sowie die Untersuchung des Einflusses der Schwerverkehrsbelastung auf die Zustandsentwicklung an Auswerteabschnitten in Asphaltbauweise. Zunächst wurden die einzelnen Schritte der Datenaufbereitung erläutert, die für eine Anwendung von latenten Wachstumskurvenmodellen auf die Straßenzustandsdaten notwendig waren. Für die Überprüfung der aufgestellten Arbeitshypothesen wurden verschiedene Modellvarianten entwickelt und vergleichend gegenübergestellt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass die Zustandsentwicklung der mittleren Spurrinnentiefe im Mittel einen leicht degressiven Funktionsverlauf aufweist. Eine Differenzierung des Zustandsverlaufs in Abhängigkeit der Schwerverkehrsbelastung bestätigt den erwarteten großen Einfluss des Schwerverkehrs auf die Entwicklung der mittleren Spurrinnentiefe. Während in den Bereichen des ersten und zweiten Überholfahrstreifens mit einer niedrigen Schwerverkehrsbelastung ein deutlich degressiver Zustandsverlauf zu erkennen ist, kann für die Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise mit einer hohen Schwerverkehrsbelastung ein annähernd linearer, zum Teil progressiver, Zustandsverlauf ermittelt werden.

Im Hinblick auf die Prognose der Entwicklung der mittleren Spurrinnentiefe ist festzuhalten, dass eine Differenzierung nach vorhandener Schwerverkehrsbelastung zu empfehlen ist. Dies kann im Falle der DMS anhand des Fahrstreifens erfolgen, da auf allen Netzknotenabschnitten eine annähernd gleiche durchschnittliche tägliche Verkehrsbelastung vorliegt und somit einzig die Verteilung des Schwerverkehrs auf die Fahrstreifen maßgebend ist. Weitere wichtige Prädiktoren für die Zustandsentwicklung, wie bspw. Materialkennwerte und Informationen zur erreichten Einbauqualität, wurden nicht untersucht, da hierzu netzweit bisher nicht flächendeckend Daten in ausreichender Qualität vorliegen.

---

## 7 Prognose der Zustandsentwicklung

---

### 7.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden Modellvarianten für die probabilistische Prognose der Zustandsgröße „mittlere Spurrinnentiefe“ (MSPT) entwickelt, auf eine unabhängige Teilmenge der Zustandsdaten der DMS angewendet und anschließend validiert. Wie in Kapitel 5 anhand von statistischen Voruntersuchungen erläutert, führt eine mangelnde Aufbereitung der Datengrundlage zu einer fehlerhaften Schätzung der Schädigungsraten. Weiterhin wurde in Kapitel 6 mit Hilfe von Wachstumskurvenmodellen aufgezeigt, dass die Entwicklung der Spurrinnentiefen in Abhängigkeit der Schwerverkehrsbelastung variiert. Um die Auswirkungen der oben beschriebenen Eigenschaften auf die Prognoseergebnisse zu beurteilen werden die folgenden drei Modellvarianten erstellt.

Modellvariante 1 basiert auf einem homogenen Markov-Prozess nach der oftmals angewendeten Vorgehensweise mit nicht aufbereiteten Daten (vgl. Kapitel 3.7.1). Bei dieser Modellvariante sind die schlechtesten Prognoseergebnisse zu erwarten. Modellvariante 2 basiert ebenfalls auf einem homogenen Markov-Prozess. Hierbei wurde die verwendete Datengrundlage jedoch zunächst mit Hilfe eines Kalman-Filters aufbereitet (vgl. Kapitel 5.6). Aufgrund der Datenaufbereitung ist eine deutliche Verbesserung der Zustandsprognose zu erwarten. Mit Modellvariante 3 werden zusätzlich die Erkenntnisse aus Kapitel 6 aufgegriffen und mit Hilfe eines inhomogenen Markov-Prozesses sowie aufbereiteten Daten eine schwerverkehrsabhängige Zustandsprognose durchgeführt. Aufgrund der Datenaufbereitung und der Berücksichtigung des Schwerverkehrs als zusätzlichen Prädiktor sind für diese Modellvariante die besten Prognoseergebnisse zu erwarten.

Für die Validierung und Beurteilung der Güte der Prognoseergebnisse je Modellvariante werden die prognostizierten Zustandsverteilungen den „wahren“ Zustandsverteilungen nach einer Liegezeit von 20 Jahren gegenübergestellt. Es erfolgt zunächst eine Gegenüberstellung der mit dem homogenen Markov-Prozess berechneten Ergebnisse (Modellvariante 1) mit den Ergebnissen aus Modellvariante 2, bei der zuvor eine Datenaufbereitung mittels Kalman-Filter durchgeführt wurde. Mit Modellvariante 3 wird schließlich beurteilt, inwieweit eine zusätzliche Differenzierung nach Fahrstreifennummer (Modellvariante 3) zu einer verbesserten Zustandsprognose führt.

### 7.2 Methodische Vorgehensweise

Nachfolgend wird ein Überblick zu der methodischen Vorgehensweise gegeben, die für die Entwicklung und Validierung der Modellvarianten zur Prognose der Zustandsentwicklung angewendet wird. Die Umsetzung der dargestellten Arbeitsschritte erfolgt in den darauffolgenden Unterkapiteln.

#### 1. Festlegung und Aufbereitung der Datengrundlage

Sowohl für die Modellvalidierung als auch zum Teil für die Modellentwicklung werden die Zeitreihen der „wahren“ Zustandsentwicklungen aller Auswerteabschnitte verwendet (vgl. Kapitel 5.6). Diese werden zunächst zufällig in Entwicklungs- und Validierungsdaten unterteilt. Die Entwicklungsdaten werden ausschließlich zur Parametrisierung der erstellten Modellvarianten genutzt, während die Validierungsdaten ausschließlich für die Beurteilung der Prognosegüte je Modellvariante verwendet werden.

## 2. Entwicklung von Modellvarianten

Es werden insgesamt drei Modellvarianten erarbeitet. Die Arbeitsschritte zur Erstellung dieser Modellvarianten gliedern sich wie folgt:

1. Ermittlung der empirischen absoluten Häufigkeiten an Zustandsänderungen
2. Berechnung der empirischen relativen Häufigkeiten an Zustandsänderungen
3. Erstellung der empirischen Übergangsmatrix
4. Berechnung des Mittelwertes und der Standardabweichung der empirischen Übergangsverteilung je Zustandsklasse innerhalb der Übergangsmatrix
5. Approximation der Übergangsverteilung in den stark besetzten Zustandsklassen anhand einer Gammaverteilung
6. Extrapolation der Übergangsverteilungen in den höheren Zustandsklassen auf Basis von Mittelwerten und Standardabweichungen mittels Regression

## 3. Validierung der Modellvarianten

Die Validierung der Modellvarianten erfolgt anhand einer Gegenüberstellung der Prognoseergebnisse mit der „wahren“ Zustandsverteilung des Validierungsdatensatzes. Als Gütekriterium werden die Abweichungen zwischen „wahrem“ und prognostiziertem Zustand beurteilt. Die Beurteilung erfolgt mit Hilfe von statistischen Kenngrößen sowie der grafischen Ausgabe und Beurteilung der Ergebnisse. Als statistische Kenngrößen werden für den Vergleich der Mittelwert, die Standardabweichung, das Minimum, das Maximum sowie das 5-%- und 95-%-Quantil der Zustandsverteilungen verwendet.

Die Abbildung 98 fasst die beschriebenen Arbeitsschritte im Rahmen der Datenaufbereitung und Modellentwicklung zusammen.

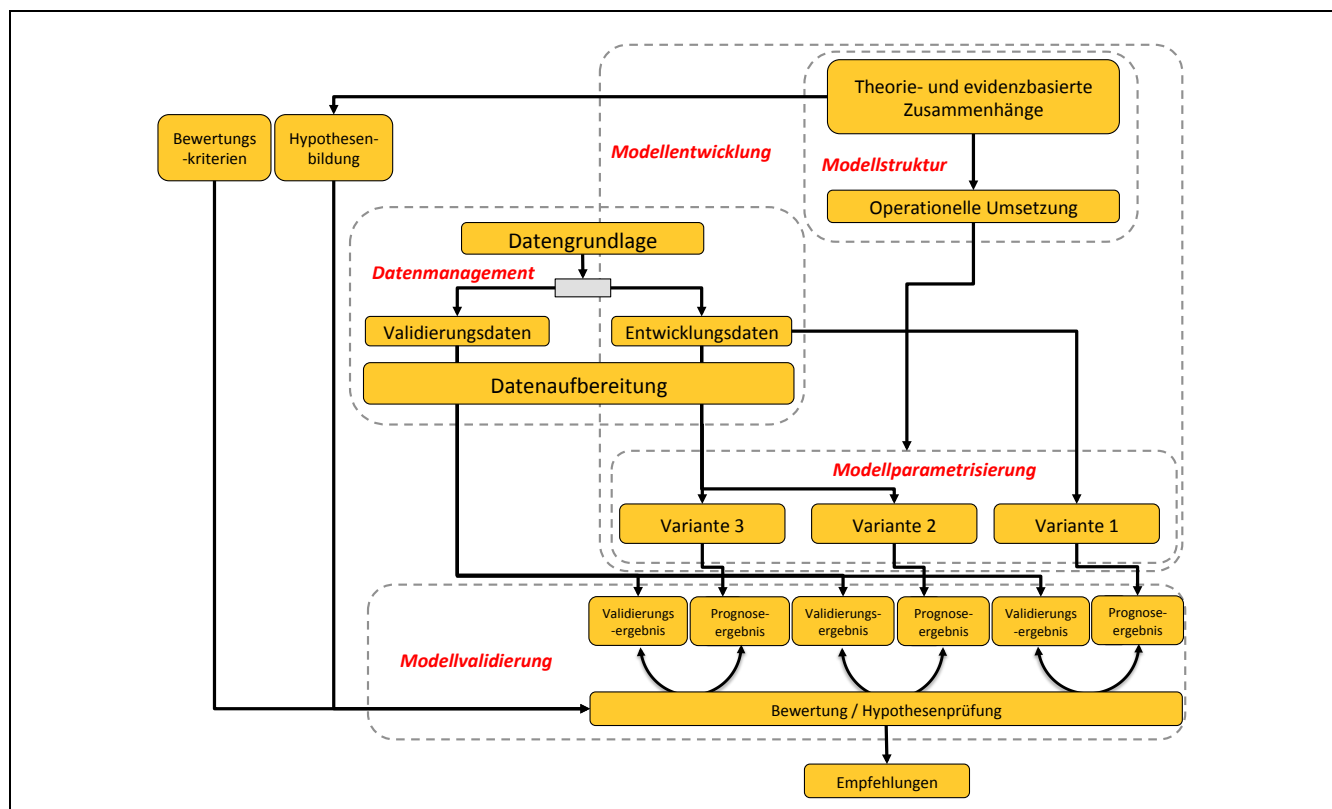


Abbildung 98: Methodik zur Entwicklung und Validierung der Modellvarianten

## 7.3 Festlegung und Aufbereitung der Datengrundlage

Die Datenaufbereitung gliedert sich in die beiden Teilschritte der Aufteilung der Datengrundlage (vgl. Kapitel 4) in Entwicklungs- und Validierungsdaten sowie der aufgrund der Messunsicherheiten notwendigen Abschätzung der wahren Zustandsentwicklung je Auswerteabschnitt mit Hilfe des Kalman-Filters (vgl. Kapitel 5.6).

### 7.3.1 Aufteilung des Datensatzes in Entwicklungs- und Validierungsdaten

Die Überprüfung der Güte des zu entwickelnden Prognosemodells muss anhand eines „unabhängigen“ Datensatzes erfolgen. Dazu wird der vorliegende Datensatz der DMS vorab in Entwicklungs- und Validierungsdaten aufgeteilt. Dies erfolgt mit dem Holdout-Verfahren, welches den Datensatz in zwei disjunkte Teildatensätze unterteilt. Während der Entwicklungsdatsatz für die Schätzung der Modellparameter herangezogen wird, erfolgt die Überprüfung der Prognosefähigkeit des Modells auf Basis des Validierungsdatsatzes. Für ausreichend große Datensätze ( $N > 100$ ) empfehlen Kerlinger und Pedhazur [1973] sowie Green und Tull [1982] eine zufällige Unterteilung des Datensatzes. Die relative Aufteilung der Datensätze ist ebenfalls abhängig von der Größe des Gesamtdatensatzes, wobei die Aufteilung bei großen Datensätzen von geringerer Bedeutung ist [Albers, Klapper, Konradt, Walter, Wolf 2009]. Für mittelgroße Datensätze ( $20 \leq N \leq 100$ ) schlagen Steckel und Vanhonacker [1993] einen relativen Anteil für die Größe des Validierungsdatsatzes zwischen einem Drittel und einem Viertel vor.

Bei sehr großen Datensätzen, wie sie bei der Analyse von Straßenzustandsdaten meist vorliegen, empfehlen Tam und Quintus [2003] ein Verhältnis von 70 % zu 30 % bzw. 80 % zu 20 % zwischen Entwicklungs- und Validierungsdaten, welches auch für die Entwicklung und Kalibrierung der US-amerikanischen Long-Term-Pavement-Performance-Modelle verwendet wird. Aufgrund der Größe des vorliegenden Datensatzes ( $N > 3.000$ ) wird für den Validierungsdatsatz ein relativer Anteil von 20 % gewählt. Die Aufteilung des Datensatzes erfolgte unter Anwendung eines zufallsbasierten Algorithmus mit Hilfe des Statistikpakets SPSS 23. Anhand des Wilcoxon-Mann-Whitney-Tests (U-Test) für unabhängige Stichproben wurde anschließend geprüft, ob sich die beiden zufällig gezogenen Stichproben signifikant zu einem der Messzeitpunkte unterscheiden. In Anhang A5 sind die Ergebnisse des U-Tests je Messzeitpunkt dargestellt. Es ist anzunehmen, dass zu keinem der Erhebungszeitpunkte überzufällige Unterschiede zwischen den beiden Stichproben bestehen.

Auch für die Fahrstreifen und die Bauweise der Auswerteabschnitte wurde auf Unterschiede zwischen der Stichprobe für die Modellentwicklung und für die -validierung geprüft. Hierzu wurden  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstests mit SPSS 23 berechnet, um sicherzustellen, dass die Zusammensetzung der Auswerteabschnitte im Hinblick auf die Fahrstreifennummer und die Bauweise unabhängig von der Stichprobenzuordnung ist (siehe Tabelle 26 und Tabelle 27).

Tabelle 26: Deskriptive Ergebnisse des  $\chi^2$ -Tests zur Verteilung der Fahrstreifen auf die Entwicklungs- und Validierungsdaten

		Fahrstreifen			Summe
		1	2	3	
Entwicklungsdaten	~80 %	1.425	1.357	87	2.869
Validierungsdaten	~20 %	364	343	16	723
Summe		1.789	1.700	103	3.592



Tabelle 27: Deskriptive Ergebnisse des  $\chi^2$ -Tests zur Verteilung der Bauweise auf die Entwicklungs- und Validierungsdaten

		Bauweise			Summe
		1	2	unbekannt	
Entwicklungsdaten	~80 %	2.303	564	2	2.869
Validierungsdaten	~20 %	566	157	0	723
Summe		2.869	721	2	3.592

Weder für den Fahrstreifen ( $\chi^2 = 1.41$ ,  $df = 2$ ,  $p = .49$ ) noch für die Bauweise ( $\chi^2 = 2.01$ ,  $df = 2$ ,  $p = .37$ ) konnten signifikante Zusammenhänge mit der Stichprobe festgestellt werden. Somit kann zusammenfassend festgestellt werden, dass sich die beiden zufällig unterteilten Stichproben der Entwicklungs- und Validierungsdaten nicht systematisch voneinander unterscheiden.

### 7.3.2 Abschätzung der wahren Zustandsentwicklung

Die Ergebnisse der regulären ZEB-Kampagnen 2001, 2005, 2009 und 2013 sowie die halbjährlichen Zustandserfassungen zwischen Frühjahr 2011 und Herbst 2015 wurden dazu genutzt, den wahren Zustandsverlauf jedes 100-m-Auswerteabschnittes abzuschätzen. Dafür wurden aus den Messergebnissen der Zustandserfassungen zunächst die wahren Zustandsverläufe mit Hilfe des Kalman-Filters (vgl. Kapitel 5.6) geschätzt. Aufgrund der halbjährlich durchgeführten Zustandserfassungen liegen für Auswerteabschnitte ohne zwischenzeitlich durchgeführte Maßnahmen insgesamt mindestens 16 Messergebnisse je Zeitreihe vor, die für die Abschätzung des wahren Zustands innerhalb des Prognosezeitraums verwendet werden können. Die Daten wurden zunächst um sämtliche Auswerteabschnitte mit zwischenzeitlich durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen bereinigt, um eine ungestörte Zustandsentwicklung beobachten zu können. In der Abbildung 99 sind die aufbereiteten Zustandsverläufe des Validierungsdatensatzes über eine Liegezeit von 20 Jahren dargestellt.

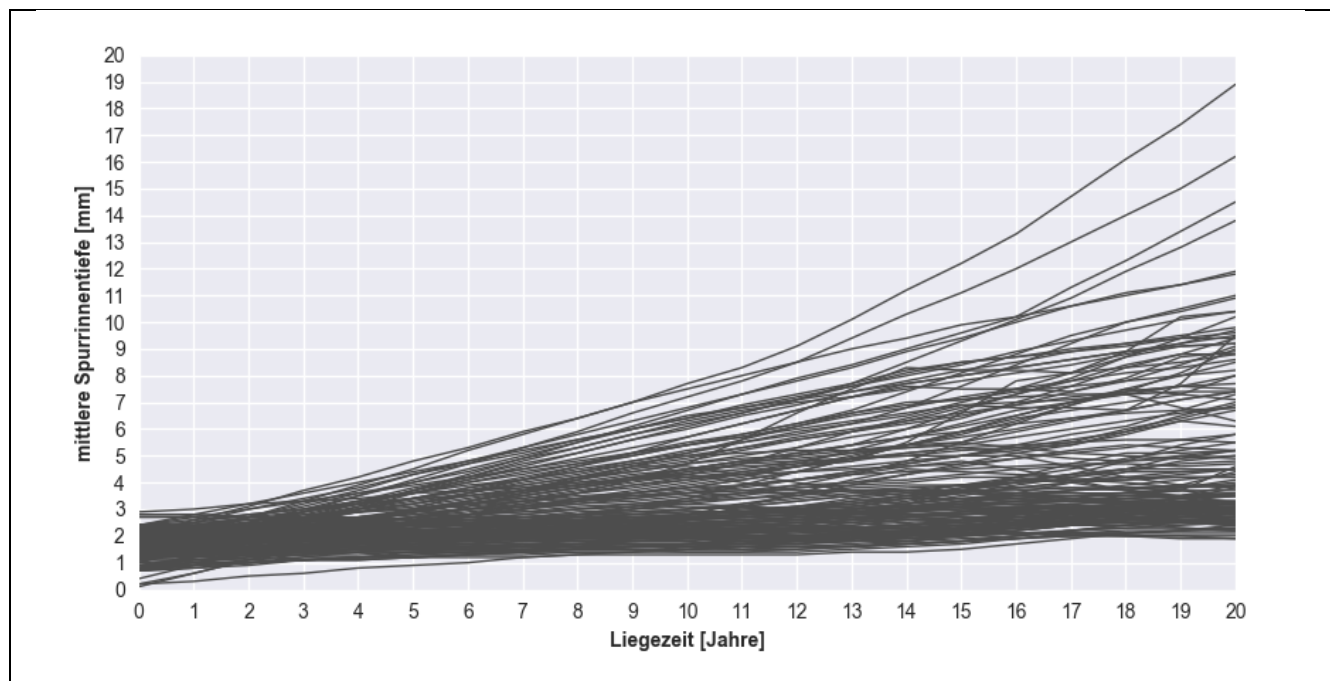


Abbildung 99: Zustandsverläufe des aufbereiteten Validierungsdatensatzes

## 7.4 Entwicklung von Modellvarianten

In diesem Abschnitt erfolgt die Entwicklung von drei Modellvarianten, die für eine probabilistische Prognose der zukünftigen Zustandsverteilung eines Teilnetzes verwendet werden sollen. Als Eingangsgrößen für die Prognoseberechnungen werden je nach Modellvariante die folgenden Informationen verwendet:

- gemessener Zustand (ungefilterte Messergebnisse)
- „wahrer“ Zustand (gefilterte Messergebnisse)
- Fahrstreifennummer

Für Modellvariante 1 wurden als Datengrundlage die ungefilterten Messergebnisse aus zwei Erfassungskampagnen verwendet. Im Gegensatz dazu erfolgte die Parametrisierung bei der Modellvariante 2 anhand von mit dem Kalman-Filter aufbereiteten Zustandsdaten. Des Weiteren wurden multivariate Übergangswahrscheinlichkeiten bei Modellvariante 3 in Abhängigkeit des Prädiktors Fahrstreifennummer ermittelt. Eine Übersicht zu den erstellten Modellvarianten ist in der Tabelle 28 gegeben.

Tabelle 28: Übersicht zu den erstellten Modellvarianten

		Datenaufbereitung	
		ungefiltert	gefiltert
Übergangswahrscheinlichkeiten	univariat	Modellvariante 1	Modellvariante 2
	multivariat	–	Modellvariante 3

Im nachfolgenden Abschnitt werden die drei Modellvarianten mit den Entwicklungsdaten parametrisiert.

### 7.4.1 Modellvariante 1

Die erste Modellvariante stellt die klassische Methodik eines homogenen Markov-Prozesses dar und basiert auf den ungefilterten Zeitreihen. Die Ermittlung der Übergangswahrscheinlichkeiten erfolgt nach der derzeit üblichen, jedoch fragwürdigen Vorgehensweise (vgl. Kapitel 5.4). Hierbei werden lediglich zwei beliebige Messzeitpunkte mit einem zeitlichen Abstand von vier Jahren aus der Zeitreihe ausgewählt. Die zwischen den beiden Messzeitpunkten gemessenen Differenzen der Zustandsgrößen werden je Kombinationsmöglichkeit gezählt und aufsummiert. Die Abbildung 100 stellt die Modellstruktur von Variante 1 grafisch dar.

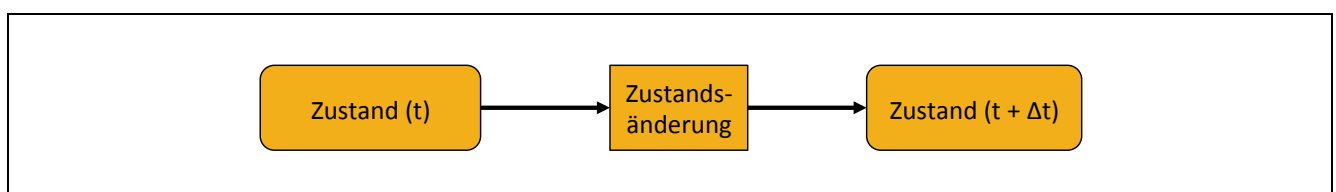


Abbildung 100: Modellstruktur zu Variante 1

Die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Zustandsänderungen zwischen den Zustandserfassungen Frühjahr 2011 und 2015 zeigt, dass bei ca. 43 % aller Auswerteabschnitte eine Zustandsverschlechterung gemessen wurde. Der Anteil an Auswerteabschnitten bei denen eine Zustandsverbesserung zwischen den beiden Messzeitpunkten gemessen wurde, beträgt etwa 55 %. Bei insgesamt nur ca. 2 % aller Auswerteabschnitte wurde hingegen der exakt gleiche Zustand zu beiden Messzeitpunkten erfasst. Die Abbildung 101 zeigt die kumulierten Häufigkeiten der nicht aufbereiteten Zustandsdaten der DMS. Alle gemessenen Zustandsverbesserungen wurden anschließend, wie in vorherigen Studien (vgl. Kapitel 3.7.1), aus dem Datensatz entfernt. Die daraus resultierenden kumulierten Häufigkeiten sind ebenfalls in der Abbildung 101 dargestellt.

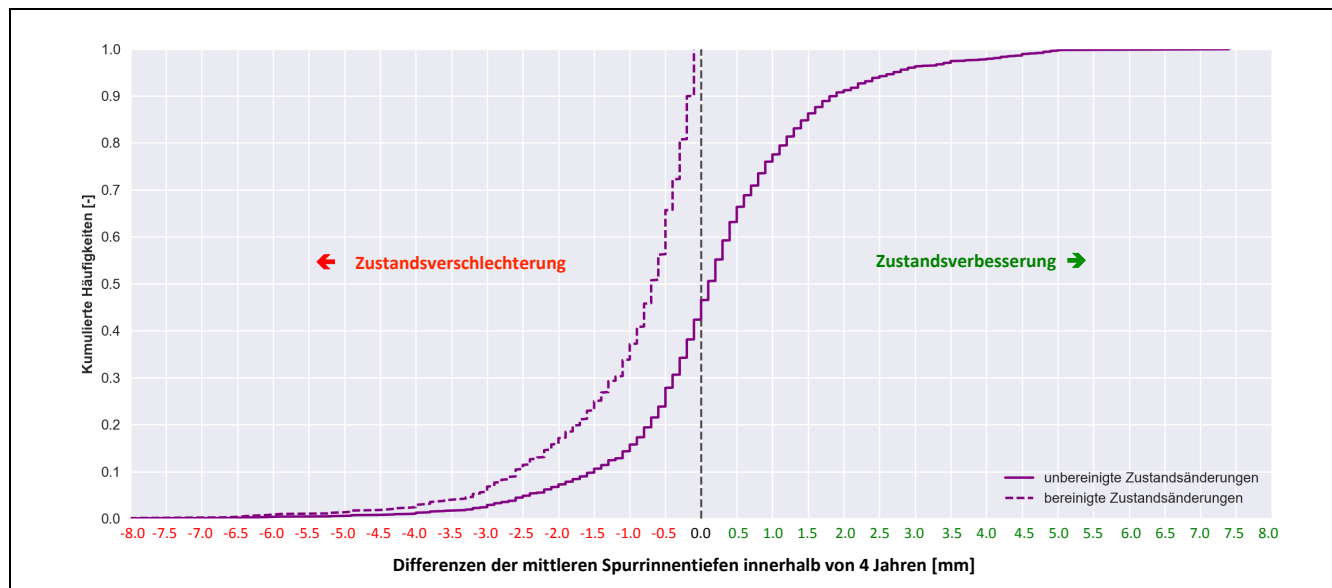


Abbildung 101: Empirische Häufigkeitsverteilung der gemessenen Zustandsänderungen und der um Zustandsverbesserungen bereinigten Zustandsänderungen innerhalb von vier Jahren von Modellvariante 1 ( $N = 1.944$ )

Im Anschluss daran wurden die relativen Übergangshäufigkeiten je Zustandsklasse berechnet. In der Abbildung 102 sind die absoluten sowie die relativen Übergangshäufigkeiten jeweils mit und ohne Zustandsverbesserungen grafisch dargestellt.

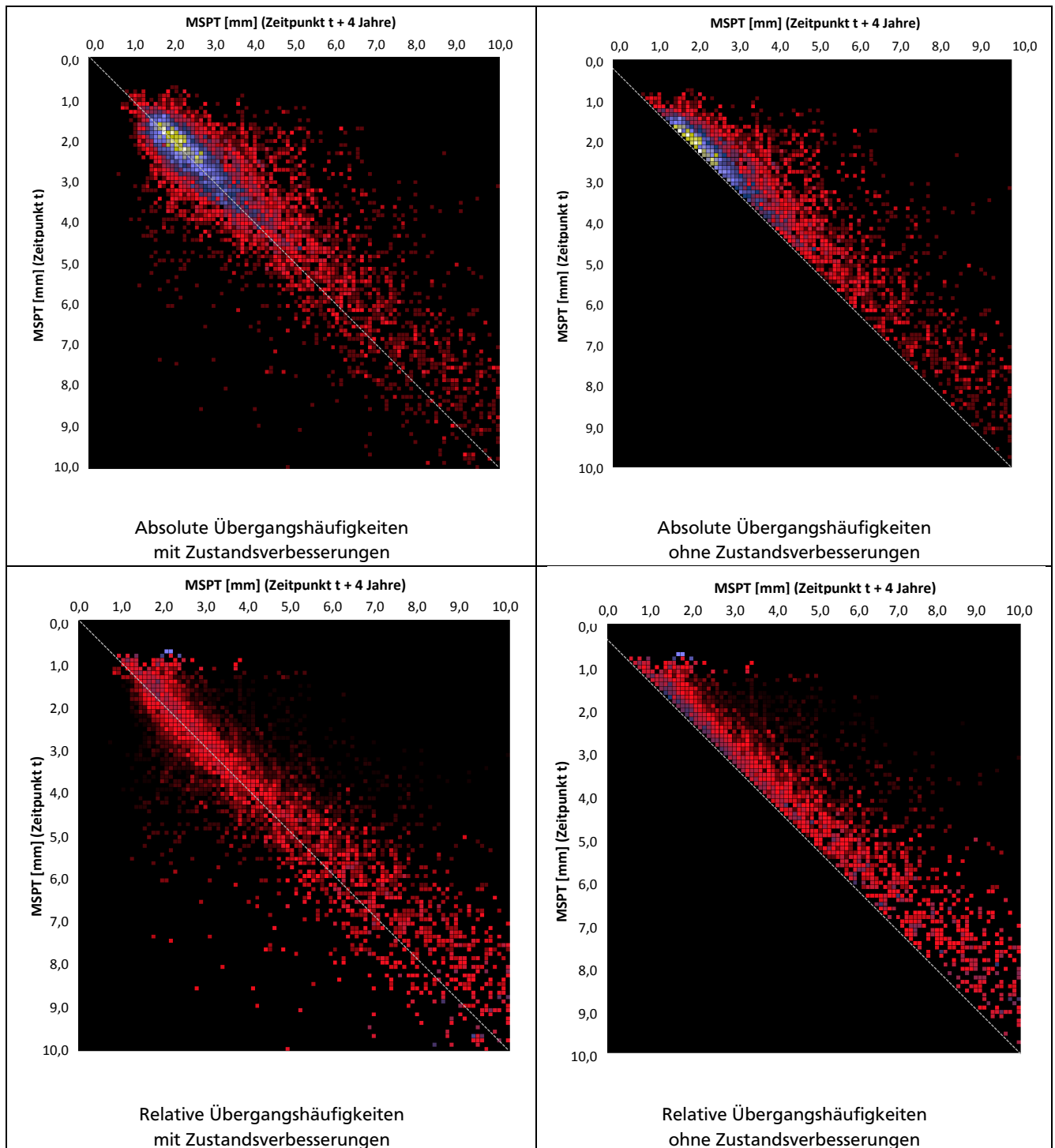


Abbildung 102: Empirische absolute Übergangshäufigkeiten ohne (oben links) und mit (oben rechts) Bereinigung von gemessenen Zustandsverbesserungen sowie relative Übergangshäufigkeiten ohne (unten links) und mit (unten rechts) Bereinigung von gemessenen Zustandsverbesserungen von Modellvariante 1

Da innerhalb der Übergangsmatrix insbesondere die höheren Zustandsklassen teilweise sehr schwach oder nicht besetzt sind, können die einzelnen Übergangshäufigkeiten in diesen Zustandsklassen nicht berechnet werden. Um diese Übergangshäufigkeiten abschätzen zu können, wurden daher zunächst der Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung der Übergangsverteilung in den besetzten Zustandsklassen berechnet (vgl. Abbildung 103).

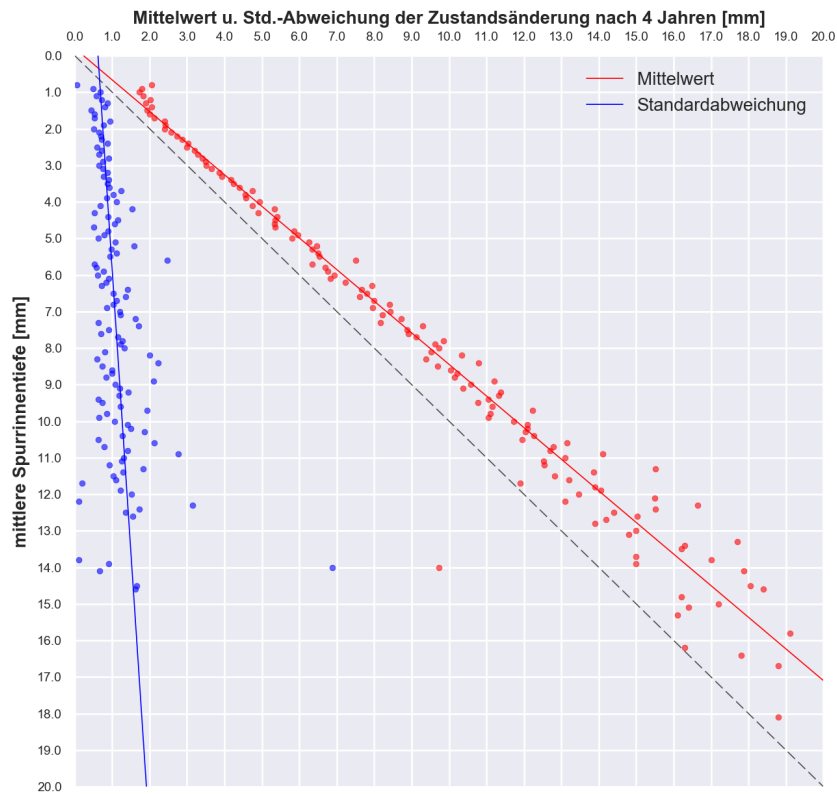


Abbildung 103: Empirischer Mittelwert und Standardabweichung der Zustandsänderungen der mittleren Spurrinnentiefe von Modellvariante 1

Sowohl für den Mittelwert als auch für die Standardabweichung der Übergangshäufigkeitsverteilung über alle Zustandsklassen ist ein annähernd linearer Verlauf zu erkennen. Als Ausgleichfunktion über alle Zustandsklassen wurde daher folgender Funktionsterm verwendet:

Formel 48: Polynomfunktion 1. Ordnung

$$y = b \cdot x + c$$

mit:

$y$	Mittelwert bzw. Standardabweichung der Zustandsänderung nach vier Jahren
$x$	mittlere Spurrinnentiefe zum aktuellen Zeitpunkt
$b$	Slope
$c$	Intercept

Mit Hilfe einer linearen Regression wurden die Regressionskoeffizienten der linearen Zusammenhänge zwischen Zustandsklasse und Mittelwert bzw. Standardabweichung berechnet und die höheren Zustandsklassen schließlich extrapoliert. Die ermittelten Regressionskoeffizienten sind in der Tabelle 29 dargestellt.

Tabelle 29: Regressionskoeffizienten des Mittelwertes und der Standardabweichung der geschätzten Übergangshäufigkeitsverteilungen über alle Zustandsklassen für Modellvariante 1

Modellvariante 1		$\mu$		$\sigma$	
		$b$	$c$	$b$	$c$
	Schätzung	1,113	0,503	0,080	0,535
	Standardfehler	0,017	0,154	0,016	0,129
	t-Wert	65,258	3,258	4,878	4,137
	$p$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$
	$R^2$	0,873		0,670	

Die empirisch ermittelten Übergangsverteilungen in den Zustandsklassen zwischen 0,0 mm und 10,0 mm wurden anschließend mit Hilfe einer theoretischen Verteilungsfunktion angenähert. Als geeigneter Funktionstyp wurde die Gammaverteilung identifiziert, da diese zu Beginn stark ansteigt und im rechten Bereich eine große Ausdehnung über die höheren Zustandsklassen aufweist. Diese Verteilung der Wahrscheinlichkeiten ist auch bei den empirisch ermittelten Übergangswahrscheinlichkeiten in den stärker besetzten Zustandsklassen zu beobachten. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Gammaverteilung ist definiert als:

Formel 49: Wahrscheinlichkeitsdichte der Gammaverteilung

$$f(x) = \begin{cases} \frac{b^p}{\Gamma(p)} x^{p-1} e^{-bx} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

mit:  $b$  inverser Skalenparameter  
 $p$  Formparameter  
 $\Gamma(p)$  Funktionswert der Gammafunktion

Die zugehörige Verteilungsfunktion ergibt sich zu:

Formel 50: Verteilungsfunktion der Gammaverteilung

$$F(x) = \begin{cases} P(p, bx) & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

Als charakteristische Kenngrößen der Gammaverteilung werden in der Regel die Parameter  $p$  und  $b$  bzw.  $\alpha$  und  $\beta$  verwendet anhand derer der Erwartungswert und die Varianz der Verteilung beschrieben werden können:

Formel 51: Erwartungswert der Gammaverteilung

$$E(x) = \frac{p}{b} = \frac{\alpha}{\beta} = k\theta$$

mit:

- $b$  inverser Skalenparameter
- $p$  Formparameter
- $\alpha$  Formparameter
- $\beta$  Umkehrung des Skalierparameters
- $k$  Formparameter
- $\theta$  Skalierparameter

Formel 52: Varianz der Gammaverteilung

$$Var(x) = \frac{p}{b^2} = \frac{\alpha}{\beta^2} = k\theta^2$$

In der Abbildung 104 sind die empirischen und geschätzten Übergangsverteilungen für elf Zustandsklassen (0,0 mm bis 10,0 mm) exemplarisch abgebildet.

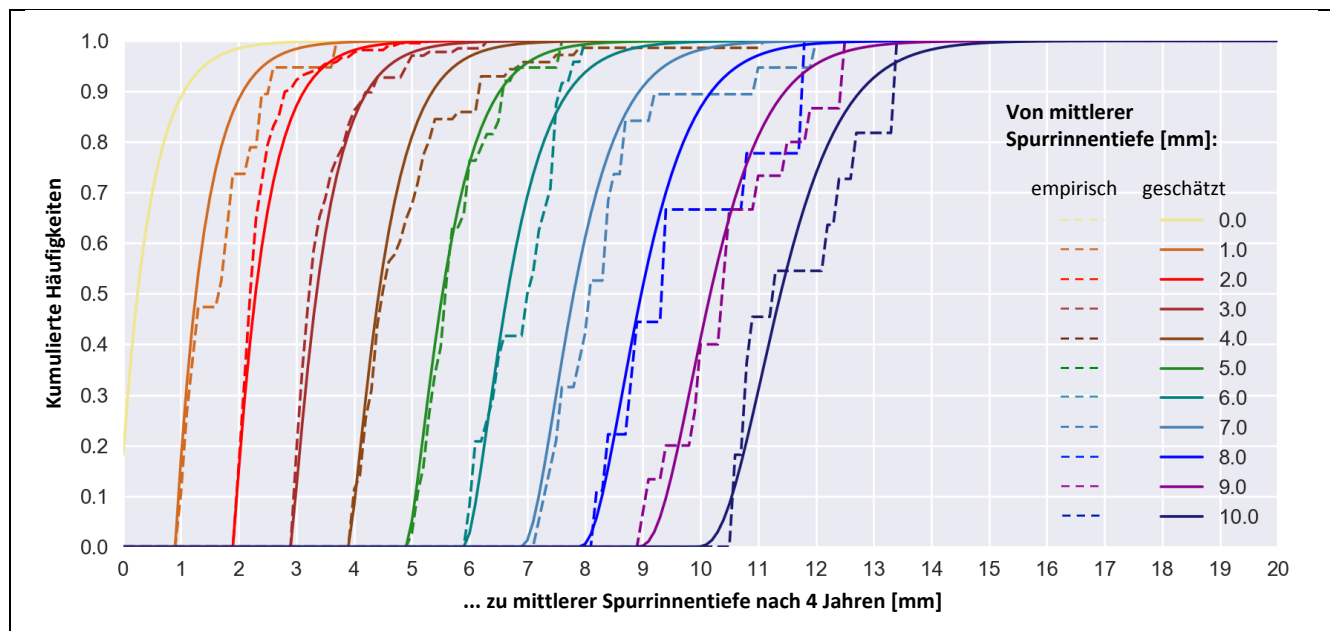


Abbildung 104: Vergleich zwischen empirischen und geschätzten Übergangsverteilungen von Modellvariante 1

Im Anschluss daran wurden unter Beibehaltung des gewählten Verteilungstyps und Verwendung der extrapolierten Mittelwerte und Standardabweichungen die Übergangsverteilungen für die höheren Zustandsklassen zwischen 10,1 mm und 20,0 mm geschätzt. Die mit Hilfe dieser Methodik vollständig gefüllte Übergangsmatrix ist in der Abbildung 105 dargestellt.

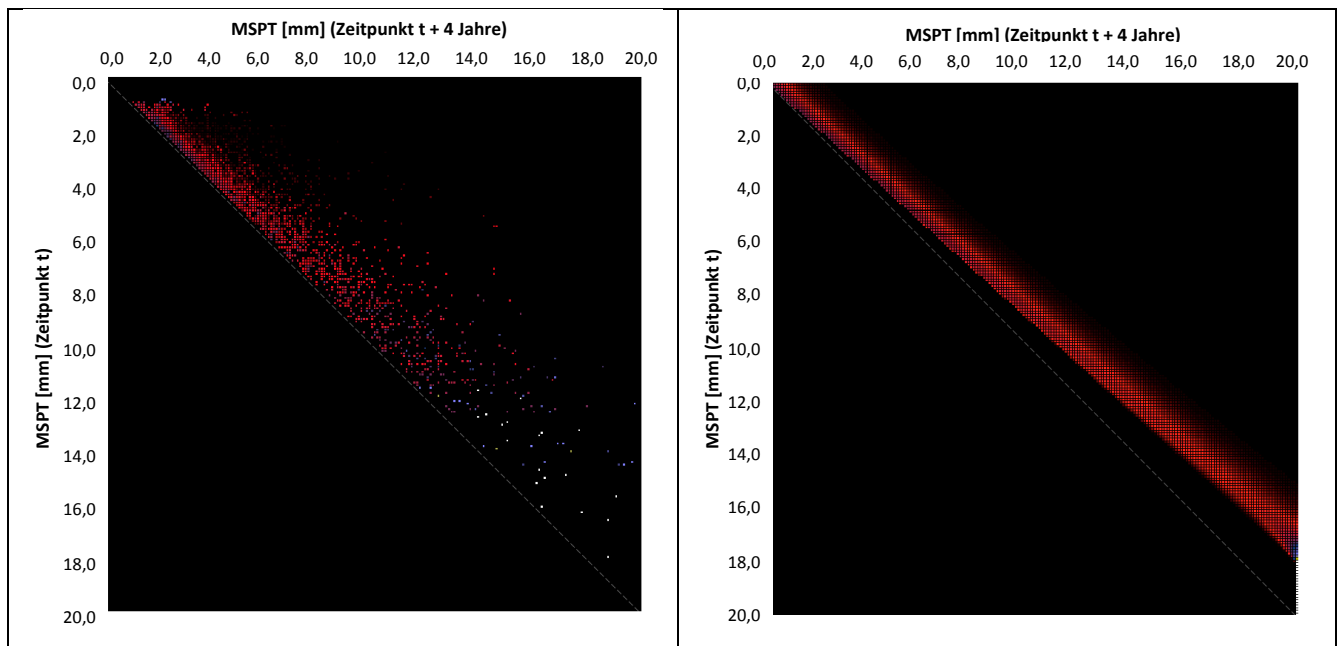


Abbildung 105: Empirische (links) und geschätzte (rechts) Übergangsmatrix von Modellvariante 1

#### 7.4.2 Modellvariante 2

Bei der zweiten Modellvariante wurde, analog zu Modellvariante 1, ebenfalls eine homogene Übergangsmatrix auf Basis von zwei Messzeitpunkten erstellt. Als Eingangsgrößen wurden die identischen Entwicklungsdaten wie in Modellvariante 1 verwendet. Hierbei wurden jedoch die einzelnen Zeitreihen jedes Auswerteabschnittes zuvor mit Hilfe eines Kalman-Filters aufbereitet, um eine verbesserte Abschätzung der tatsächlichen Zustandsänderungen innerhalb der Zeitreihe zu ermöglichen. Ziel der Berücksichtigung des bisherigen Zustandsverlaufs eines Auswerteabschnittes war eine verbesserte Abschätzung der Übergangswahrscheinlichkeiten innerhalb der Übergangsmatrix. Die Abbildung 106 zeigt die Modellstruktur von Variante 2.

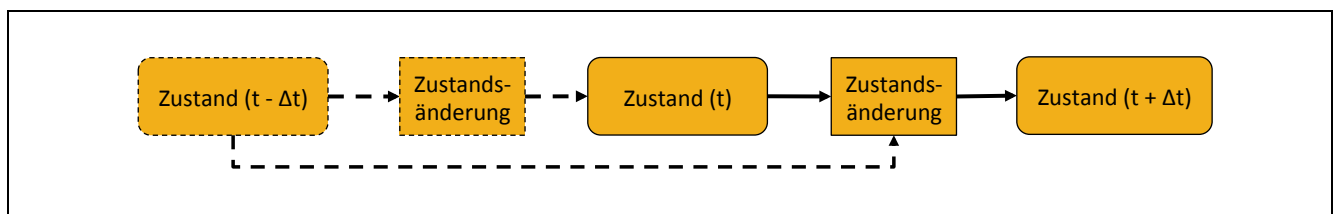


Abbildung 106: Modellstruktur zu Variante 2



Die kumulierten Übergangshäufigkeiten ohne bzw. mit Bereinigung der Zustandsverbesserungen innerhalb von vier Jahren sind in der Abbildung 107 dargestellt.

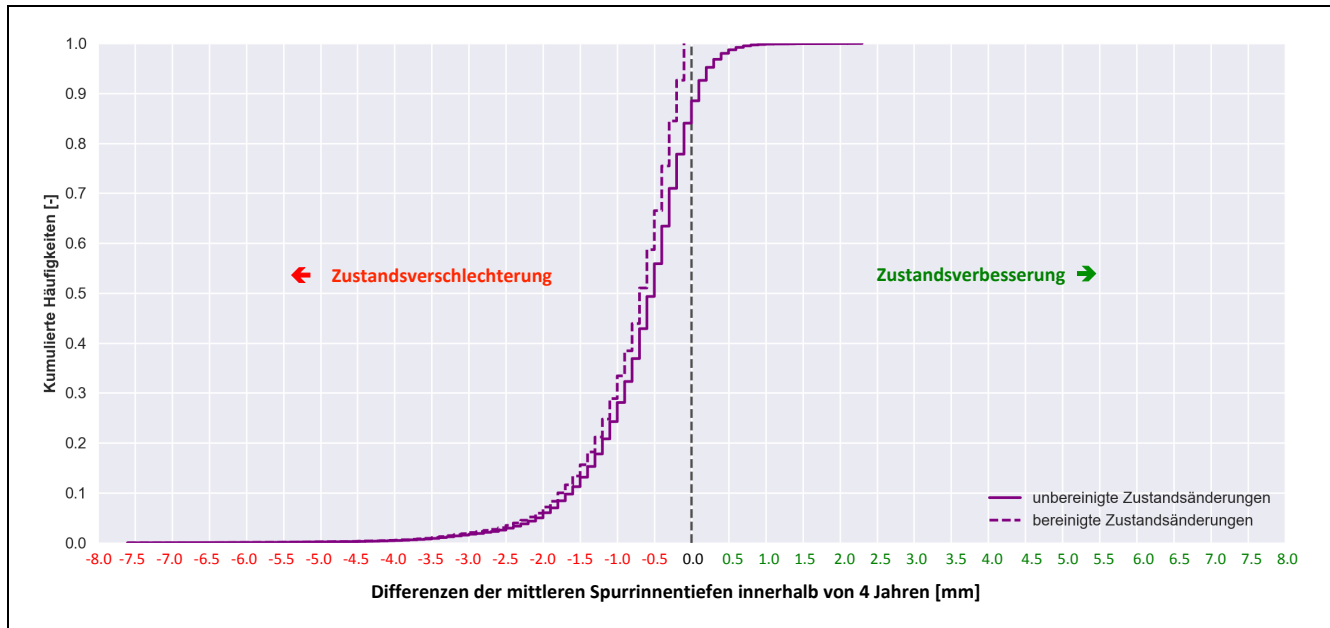


Abbildung 107: Empirische Häufigkeitsverteilung der „wahren“ Zustandsänderungen und der um Zustandsverbesserungen bereinigten Zustandsänderungen innerhalb von vier Jahren von Modellvariante 2 ( $N = 2.534$ )

Die auf insgesamt 2.534 Auswerteabschnitten basierenden kumulierten Häufigkeiten der Zustandsänderungen zeigen, dass der Anteil an tatsächlichen Zustandsverschlechterungen bei ca. 92 % liegt. Bei in etwa 5 % aller Auswerteabschnitte wurde trotz einer Filterung der Zeitreihen eine Zustandsverbesserung von bis zu 0,5 mm festgestellt. Der Anteil mit konstantem Zustandsniveau zwischen beiden Messzeitpunkten liegt bei ca. 3 %. Die Abbildung 108 zeigt die absoluten und relativen Übergangshäufigkeiten innerhalb einer Zeitspanne von vier Jahren jeweils mit und ohne Bereinigung der Zustandsverbesserungen.

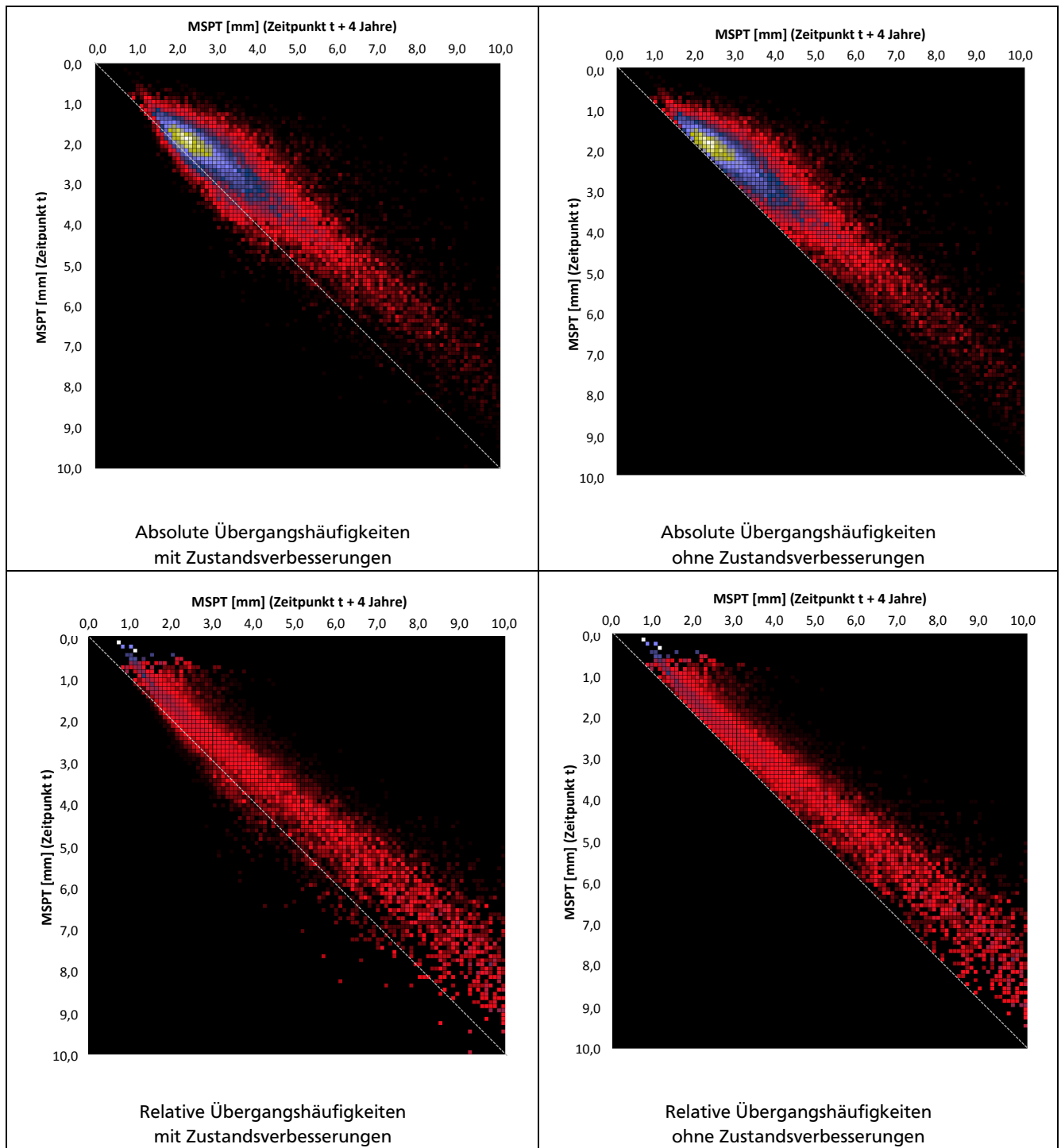


Abbildung 108: Empirische absolute Übergangshäufigkeiten ohne (oben links) und mit (oben rechts) Bereinigung von gemessenen Zustandsverbesserungen sowie empirische relative Übergangshäufigkeiten ohne (unten links) und mit (unten rechts) Bereinigung von gemessenen Zustandsverbesserungen von Modellvariante 2

Die Analyse der Mittelwerte und Standardabweichungen der Übergangsverteilungen je Zustandsklasse zeigt analog zu Modellvariante 1, dass der Schadenszuwachs mit steigender Zustandsklasse zunächst linear zunimmt. In den höheren Zustandsklassen ist jedoch eine stärkere mittlere Schadenszunahme zu beobachten. Die zugehörigen Standardabweichungen nehmen analog zu Modellvariante 1 über alle Zustandsklassen linear zu. Die Entwicklung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Übergangswahrscheinlichkeiten über alle Zustandsklassen sind in der Abbildung 109 dargestellt.

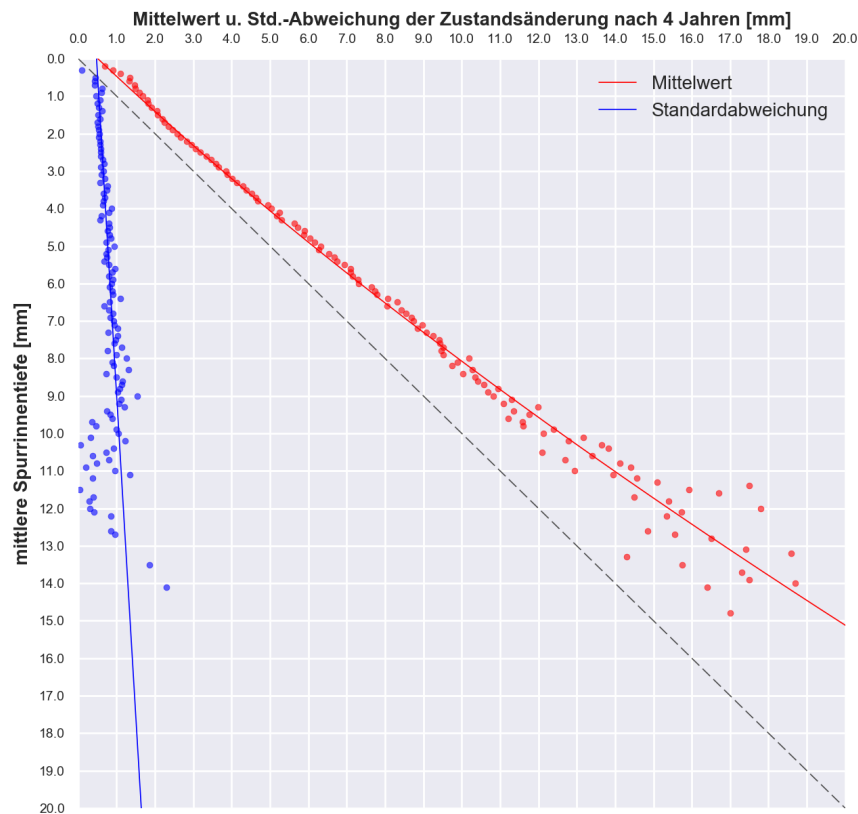


Abbildung 109: Empirischer Mittelwert und Standardabweichung der Zustandsänderungen der mittleren Spurrinnentiefe von Modellvariante 2

Für die Beschreibung der mittleren Zustandsänderungen über alle Zustandsklassen wurde ein parabelförmiger Funktionsverlauf mit folgender Grundform verwendet:

Formel 53: Polynomfunktion 2. Ordnung

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$$

mit:

$y$	Mittelwert bzw. Standardabweichung der Zustandsänderung nach vier Jahren
$x$	mittlere Spurrinnentiefe zum aktuellen Zeitpunkt
$a$	quadratischer Slope
$b$	Slope
$c$	Intercept

Die zugehörigen Standardabweichungen wurden in Anlehnung an Modellvariante 1 mit einem linearen Ansatz approximiert. Die Parameter der mittels nicht-linearer Regression ermittelten Ausgleichsfunktion für die Mittelwerte und Standardabweichungen zeigen, dass für die Mittelwerte ein sehr guter Fit vorliegt (vgl. Tabelle 30).

Tabelle 30: Regressionskoeffizienten des Mittelwertes und der Standardabweichung der geschätzten Übergangshäufigkeiten über alle Zustandsklassen für Modellvariante 2

Modellvariante 2		$\mu$			$\sigma$		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
	Schätzung	0,008	1,138	0,394	-	0,033	0,560
	Standardfehler	0,004	0,056	0,173	-	0,008	0,056
	t-Wert	1,947	20,257	2,279	-	4,206	9,955
	<i>p</i>	0,0538	≤ 0,001	≤ 0,05	-	≤ 0,001	≤ 0,001
	$R^2$	0,654			0,298		

Im Vergleich zu Modellvariante 1 ist ein leicht größerer Slope bei der Zunahme der mittleren Zustandsänderung über alle Zustandsklassen zu erkennen. Die zugehörigen Streubereiche der Zustandsänderungen fallen aufgrund der zuvor durchgeführten Aufbereitung der Daten etwas geringer aus. Eine grafische Darstellung der empirischen Übergangshäufigkeiten der Zustandsklassen 0,0 mm bis 10,0 mm zeigt, dass der zuvor für Modellvariante 1 gewählte Verteilungstyp einer Gammaverteilung auch bei Modellvariante 2 verwendet werden kann. Allerdings zeigen die aufbereiteten Daten eine stärkere Zunahme des Schadenszuwachses in Abhängigkeit der Zustandsklasse. Die durch Regression geschätzten Verteilungen der Zustandsänderungen bis zu einer Spurrinnentiefe von 8,0 mm sind in der Abbildung 110 exemplarisch dargestellt.

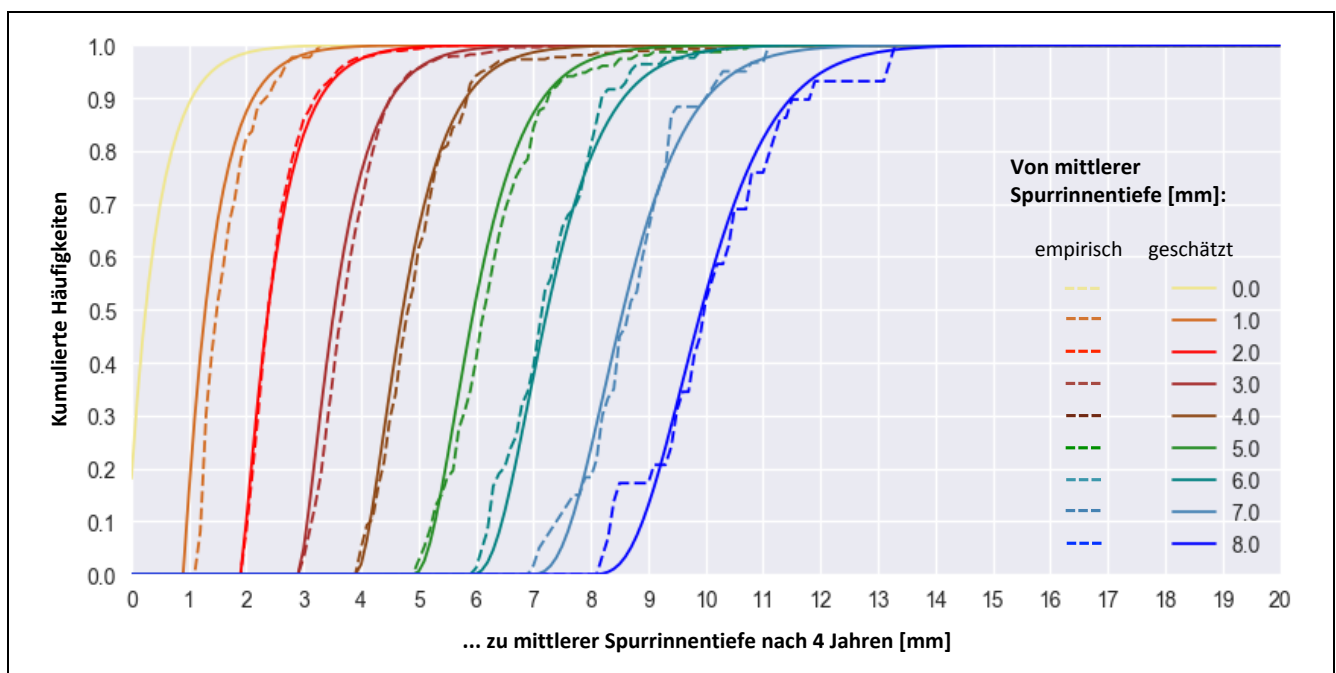


Abbildung 110: Vergleich zwischen empirischen und geschätzten Übergangsverteilungen von Modellvariante 2

Im Anschluss daran wurden analog zu Modellvariante 1 die Übergangsverteilungen in den höheren Zustandsklassen (8,0 mm bis 20,0 mm) extrapoliert. Die Abbildung 111 zeigt die empirische sowie die geschätzte Übergangsmatrix.

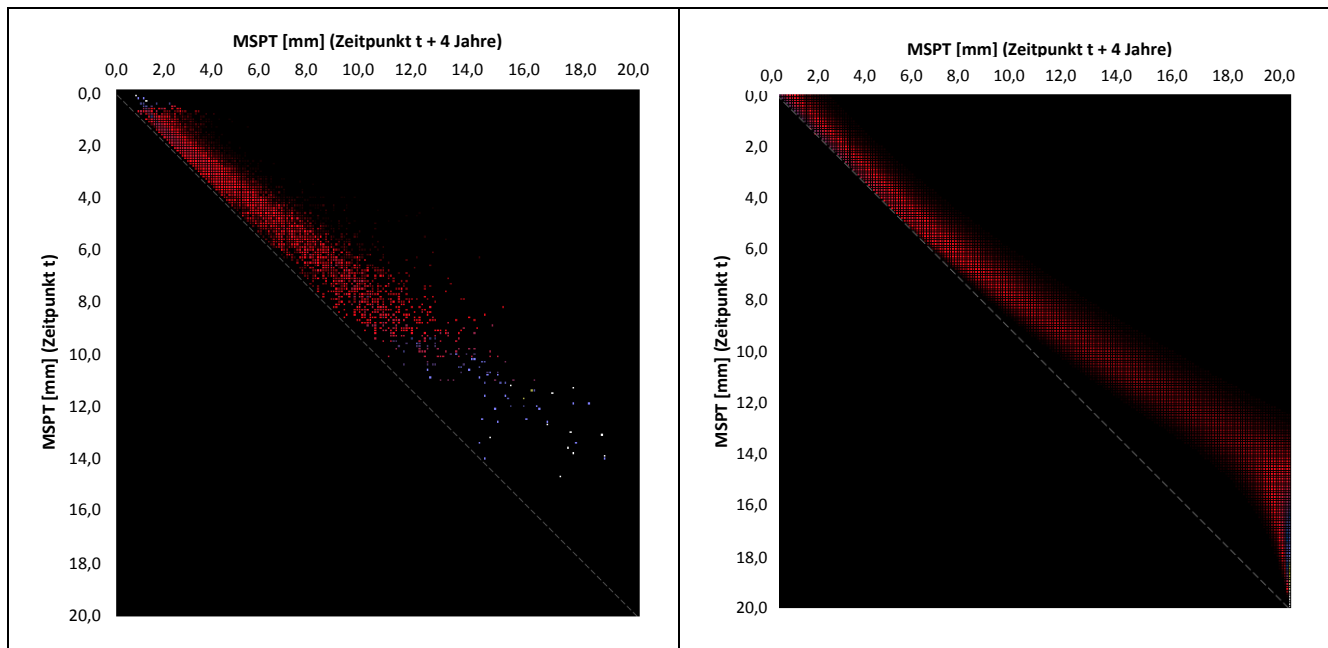


Abbildung 111: Empirische (links) und geschätzte (rechts) Übergangsmatrix von Modellvariante 2

### 7.4.3 Modellvariante 3

Im Rahmen der dritten Modellvariante wurden die Übergangshäufigkeiten in Anlehnung an Modellvariante 2 auf Basis der zuvor gefilterten Daten ermittelt. Zusätzlich wurden diese weiterhin nach dem Prädiktor Fahrstreifennummer (Schwerverkehrsbelastung) aufgrund der Ergebnisse der Wachstumskurvenmodellierung (vgl. Kapitel 6) differenziert erhoben. Durch eine Berücksichtigung des bisherigen Zustandsverlaufs als auch von erklärenden Variablen soll eine differenziertere Abschätzung der Zustandsänderungen ermöglicht werden. Die Modellstruktur von Modellvariante 3 ist in der Abbildung 112 dargestellt.

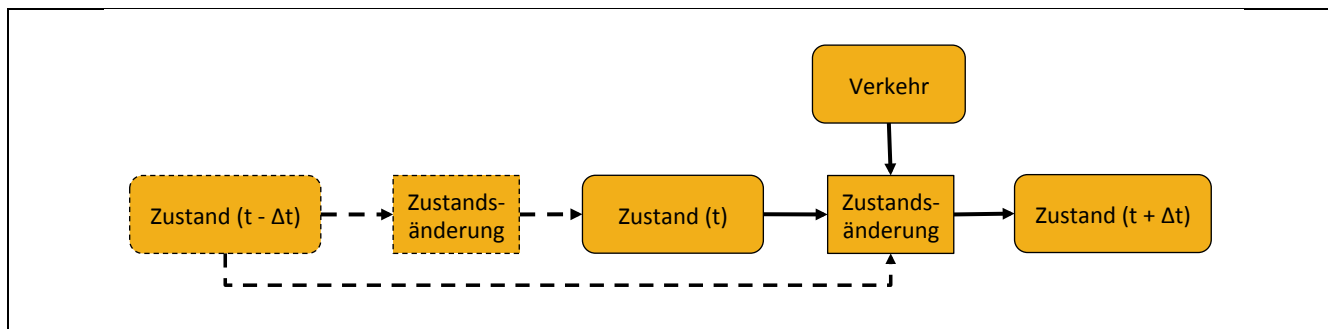


Abbildung 112: Modellstruktur zu Variante 3

Eine Analyse der kumulierten Häufigkeiten der „wahren“ Zustandsänderungen in Abhängigkeit der des Fahrstreifens zeigt, dass insbesondere Auswerteabschnitte des Hauptfahrstreifens (FS 1) eine deutlich ausgeprägte Schadenszunahme innerhalb von vier Jahren aufweisen. Der erste (FS 2) und zweite (FS 3) Überholfahrstreifen weisen hingegen ähnliche Schadenszunahmen auf. Die Abbildung 113 stellt die kumulierten Häufigkeiten der Zustandsänderungen in Abhängigkeit der Fahrstreifennummer grafisch dar.

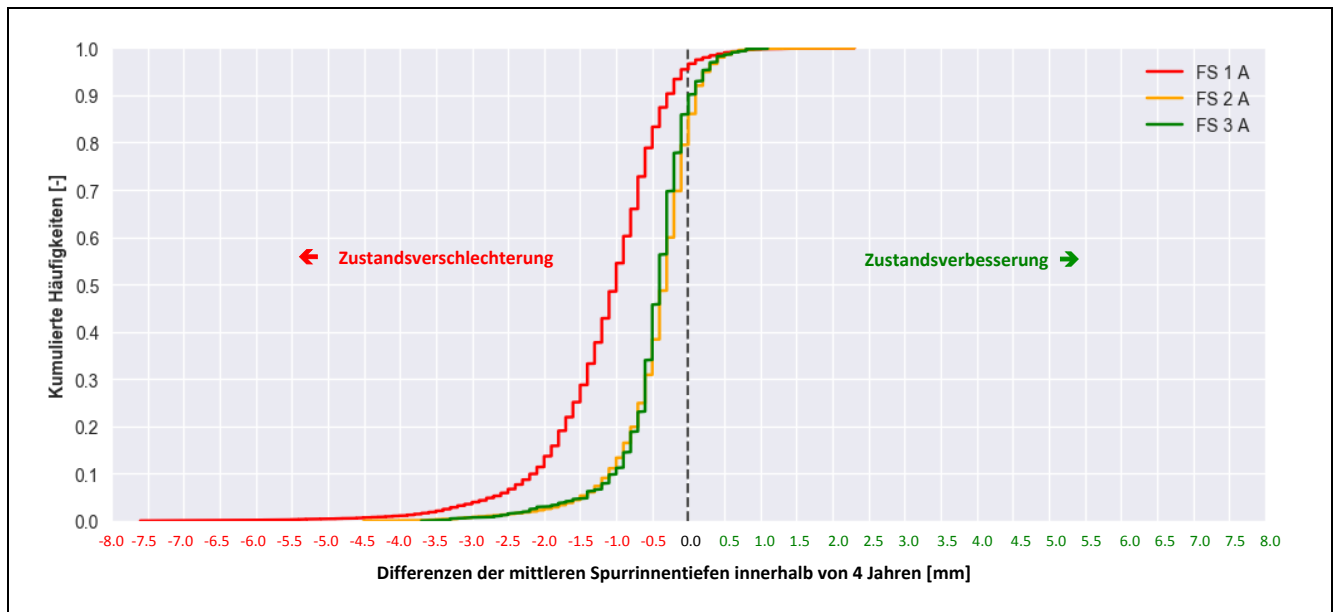
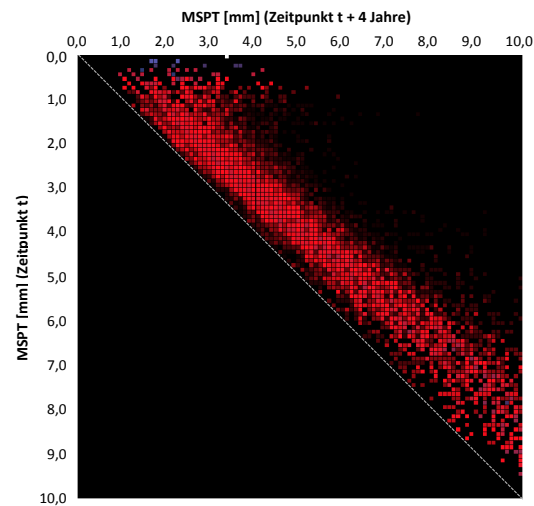


Abbildung 113: Empirische Häufigkeitsverteilungen der „wahren“ Zustandsänderungen innerhalb von vier Jahren je Fahrstreifen (Modellvariante 3)

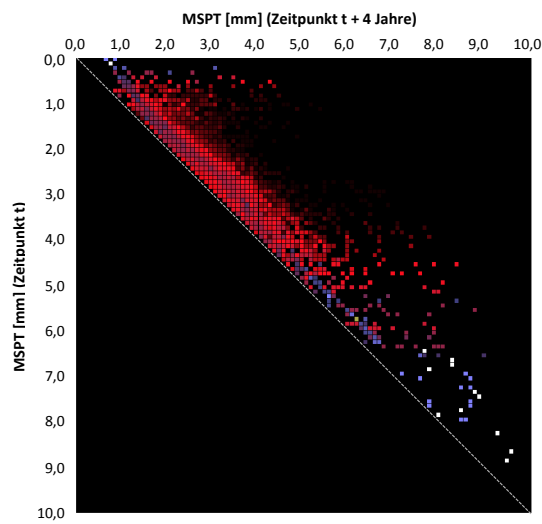
Eine Analyse der Mittelwerte und Standardabweichungen der Zustandsänderungen in Abhängigkeit des Fahrstreifens zeigte bei den Auswerteabschnitten in Asphaltbauweise eine deutlich stärkere Schadenszunahme für den Hauptfahrstreifen im Vergleich zu den anderen beiden Überholfahrstreifen, sodass die z. B. in Hinsch et al. [2005] ermittelten Abhängigkeiten sowie die Ergebnisse der Wachstumskurvenmodelle (vgl. Kapitel 6) bestätigt werden können. Die mittlere Schadenszunahme innerhalb von vier Jahren beträgt bis zu einer derzeitigen mittleren Spurrinnentiefe von etwa 6,0 mm konstant ca. 1,1 mm ( $SD = 0,8$  mm). In den höheren Zustandsklassen geht dieser lineare Trend in eine progressive Schadenszunahme über bis diese bei einer mittleren Spurrinnentiefe von 15,0 mm in etwa 5,0 mm ( $SD = 2,3$  mm) beträgt. Dies bedeutet, dass Auswerteabschnitte mit einer bereits stark ausgeprägten mittleren Spurrinnentiefe in den darauffolgenden vier Jahren eine deutliche Zustandsverschlechterung aufzeigen.

Für den 1. Überholfahrstreifen (FS 2) ist hingegen über alle Zustandsklassen eine konstante Schadenszunahme innerhalb von vier Jahren zu beobachten. Die mittlere Schadenszunahme beträgt unabhängig von der aktuellen mittleren Spurrinnentiefe ca. 0,7 mm. Die zugehörigen Standardabweichungen der Zustandsänderungen fallen im Vergleich zum Hauptfahrstreifen mit ca. 0,5 mm geringer aus.

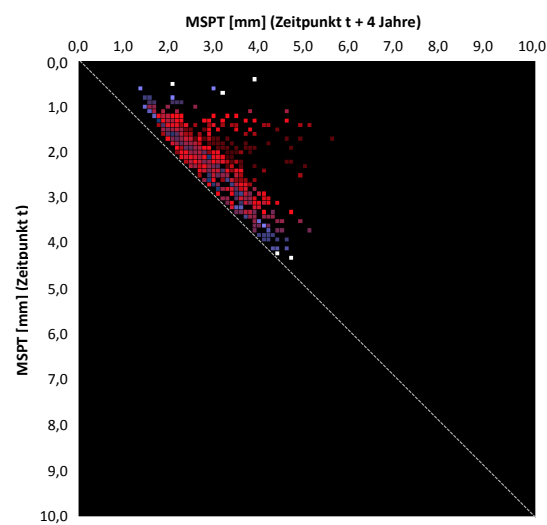
Die Auswertung der Schadenszunahmen des 2. Überholfahrstreifens (FS 3) ergibt, dass vorrangig in den niedrigen Zustandsklassen eine Zunahme der mittleren Spurrinnentiefe zu beobachten ist. In den höheren Zustandsklassen hingegen nähert sich der Verlauf der mittleren Schadenszunahme der Matrixdiagonalen, d. h. in diesen Bereichen bleibt der Zustand weitestgehend konstant. Dies kann für die in Asphaltbauweise hergestellten Auswerteabschnitten dahingehend begründet werden, dass in diesen Bereichen vorrangig eine Spurrinnenbildung durch eine Nachverdichtung des Materials zu beobachten ist, die jedoch im weiteren Verlauf stagniert. Die ermittelten Standardabweichungen der Schadenszunahme bestätigen diese Theorie. Die Abbildung 114 zeigt die empirischen um Zustandsverbesserungen bereinigten Übergangshäufigkeiten in Abhängigkeit des Fahrstreifens innerhalb einer Zeitspanne von vier Jahren.



Hauptfahrstreifen (FS 1)



1. Überholfahrstreifen (FS 2)



2. Überholfahrstreifen (FS 3)

Abbildung 114: Empirische Übergangsmatrizen der um Zustandsverbesserungen bereinigten Zustandsänderungen je Fahrstreifen (Modellvariante 3)

In den niedrigen Zustandsklassen variiert die Schadenszunahme stärker ( $SD = 0,7$  mm), da nicht alle Straßenabschnitte das Phänomen der Nachverdichtung gleichermaßen aufweisen. Sobald jedoch dieser Prozess abgeschlossen ist, verhält sich die Schadenszunahme auf diesem Fahrstreifen weitestgehend homogen ( $SD = 0,2$  mm). Die geschätzten Mittelwerte der Zustandsänderungen in Abhängigkeit des Fahrstreifens für Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise sind in der Abbildung 115 dargestellt.

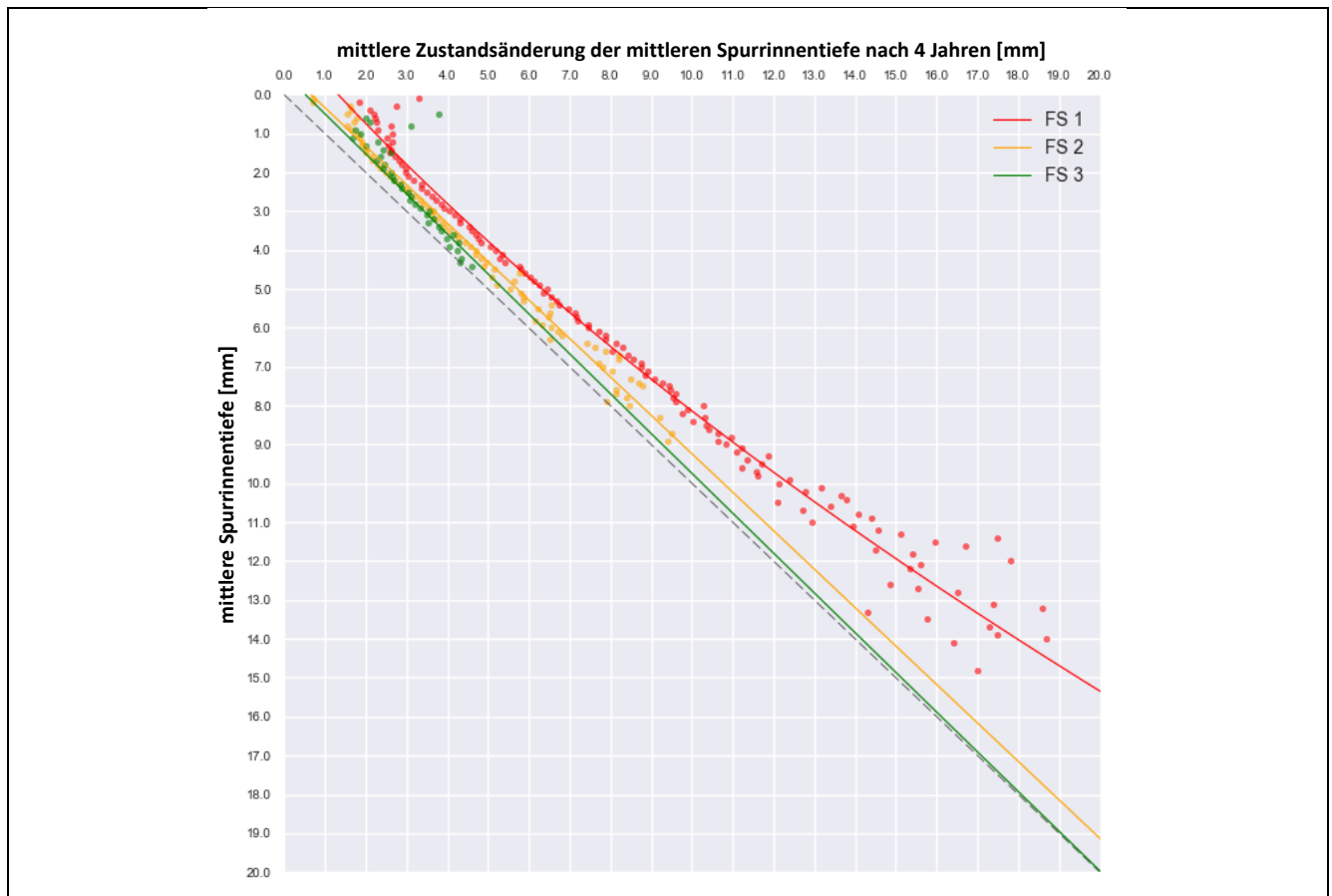


Abbildung 115: Empirische Mittelwerte der Zustandsänderungen der mittleren Spurrinnentiefe in Abhängigkeit des Fahrstreifens für Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise von Modellvariante 3

Für den Hauptfahrstreifen in Asphaltbauweise wurde auch hier, wie bei Modellvariante 2, ein parabelförmiger Ansatz als Ausgleichsfunktion gewählt. Demzufolge konnte eine lineare Zunahme der Zustandsänderung über alle Zustandsklassen abgebildet werden. Die mittleren Zustandsänderungen und deren zugehörige Standardabweichungen für den ersten Überholfahrstreifen wurden mit Hilfe einer linearen Funktion über alle Zustandsklassen beschrieben.

Auf Basis der empirischen Zustandsänderungen für den zweiten Überholfahrstreifen wurden die Mittelwerte mit einer Parabelfunktion approximiert (vgl. Abbildung 115). Für die jeweiligen Standardabweichungen wurde unabhängig des Fahrstreifens ein linearer Zusammenhang festgestellt. In der Tabelle 31 sind die geschätzten funktionalen Zusammenhänge für die Mittelwerte bzw. Stan-



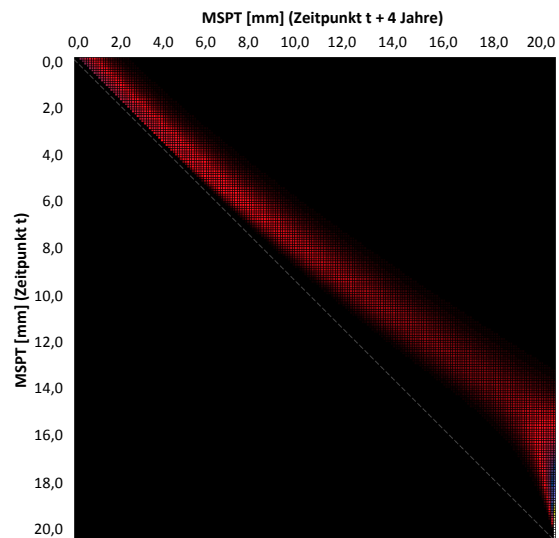
---

dardabweichungen über alle Zustandsklassen in Abhängigkeit der Fahrstreifennummer zusammengefasst.

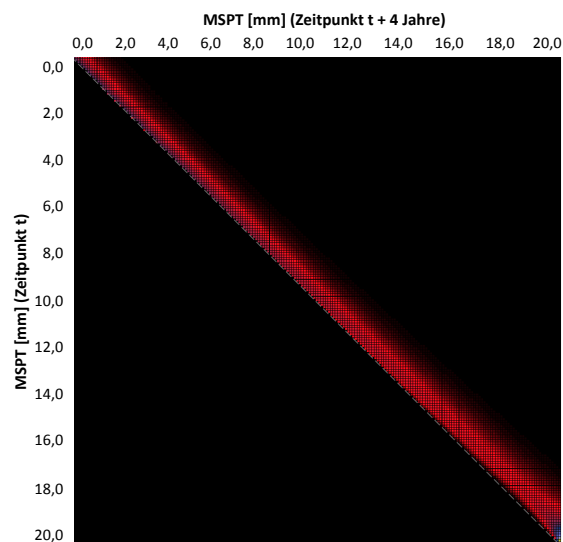
Tabelle 31: Regressionskoeffizienten des Mittelwertes und der Standardabweichung der geschätzten Übergangshäufigkeiten über alle Zustandsklassen für Modellvariante 3

	Fahrstreifen	Parameter	$\mu$			$\sigma$		
			$a$	$b$	$c$	$a$	$b$	$c$
Modellvariante 3	1	Schätzung	0,021	0,895	1,325	–	0,011	0,745
		Standardfehler	0,004	0,058	0,179	–	0,007	0,053
		t-Wert	5,051	15,315	7,982	–	1,530	13,940
		$p$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$< 0,001$	–	0,129	$\leq 0,001$
		$R^2$	0,697			0,293		
	2	Schätzung	–	1,011	0,659	–	-0,026	0,669
		Standardfehler	–	0,013	0,063	–	0,012	0,053
		t-Wert	–	77,300	10,450	–	-2,099	12,726
		$p$	–	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	–	$\leq 0,05$	$\leq 0,001$
		$R^2$	0,286			0,218		
	3	Schätzung	0,001	0,970	0,521	–	-0,159	0,794
		Standardfehler	0,050	0,246	0,266	–	0,030	0,080
		t-Wert	3,580	-0,979	9,030	–	-5,239	9,872
		$p$	$\leq 0,001$	0,339	$\leq 0,001$	–	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$
		$R^2$	0,367			0,176		

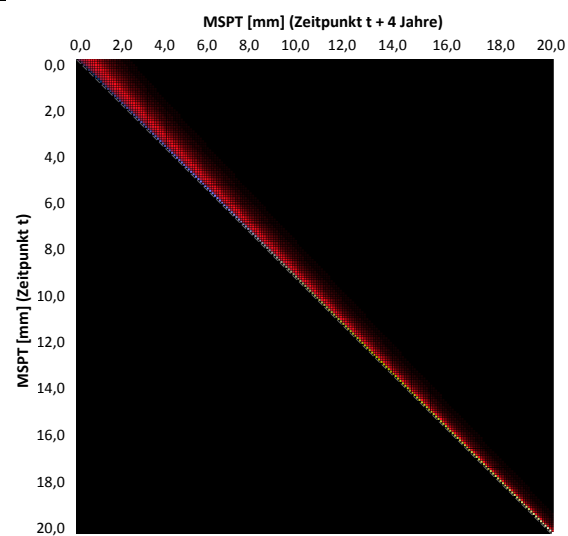
Anschließend konnten die Übergangshäufigkeiten innerhalb der Matrizen vollständig geschätzt werden. Als Verteilungstyp wurde analog zu den beiden vorherigen Modellvarianten eine Gammaverteilung verwendet. Die in der Abbildung 116 dargestellten Übergangsmatrizen zeigen die Ergebnisse dieses Extrapolationsprozesses in Abhängigkeit des Fahrstreifens.



Hauptfahrsstreifen (FS 1)



1. Überholfahrsstreifen (FS 2)



2. Überholfahrsstreifen (FS 3)

Abbildung 116: Geschätzte Übergangsmatrizen je Fahrstreifen von Modellvariante 3

## 7.5 Validierung von Modellvarianten

Im Anschluss an die Entwicklung der drei Modellvarianten werden diese nun validiert. Die Validierung eines Modells dient der Bestätigung, dass die mit dem Modell berechneten Ergebnisse die zuvor festgelegten Anforderungen erfüllen [DIN EN ISO 9000]. Es wird damit gezeigt, dass das entwickelte Modell an die vorgegebene Problemstellung angepasst ist und die tatsächlichen Zusammenhänge hinreichend genau abbildet. Die Validierung erfolgt anhand einer unabhängigen Datengrundlage. Diese wurde vor Beginn der Modellentwicklung anhand eines zufälligen Auswahlverfahrens ausgewählt (vgl. Kapitel 7.3.1).

Für die Beurteilung der Prognoseergebnisse wird anschließend der Vergleich zwischen prognostizierter und „wahrer“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren herangezogen. Da die Bewertung der Prognoseergebnisse nicht, wie sonst üblich, anhand eines Vergleichs von Mittelwerten sondern Verteilungen erfolgt, werden zur Beurteilung der Modellgüte die statistischen Kenngrößen Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum verwendet. Die Validierung der Modellvarianten erfolgt analog zur Modellentwicklung nur für Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise.

### 7.5.1 Modellvariante 1

Die mit Modellvariante 1 berechneten Prognoseergebnisse zeigen, dass der mittlere Zustandsverlauf hinreichend gut wiedergegeben wird. Lediglich ab einer Liegezeit von 15 Jahren wird die mittlere Schadenszunahme leicht überschätzt. Die zugehörigen Streuungen werden zu Beginn des Prognosezeitraumes überschätzt und ab einer Liegezeit von 15 Jahren zunehmend unterschätzt. Die Abbildung 117 zeigt den Vergleich zwischen dem mit Hilfe von Modellvariante 1 prognostizierten mittleren Zustandsverlauf und dem aus den Validierungsdaten abgeleiteten „wahren“ mittleren Zustandsverlauf der mittleren Spurrinnentiefe über eine Liegezeit von 20 Jahren. Die farbig schraffierten Flächen zeigen jeweils die 2 $\sigma$ -Umgebung des Zustandsverlaufs.

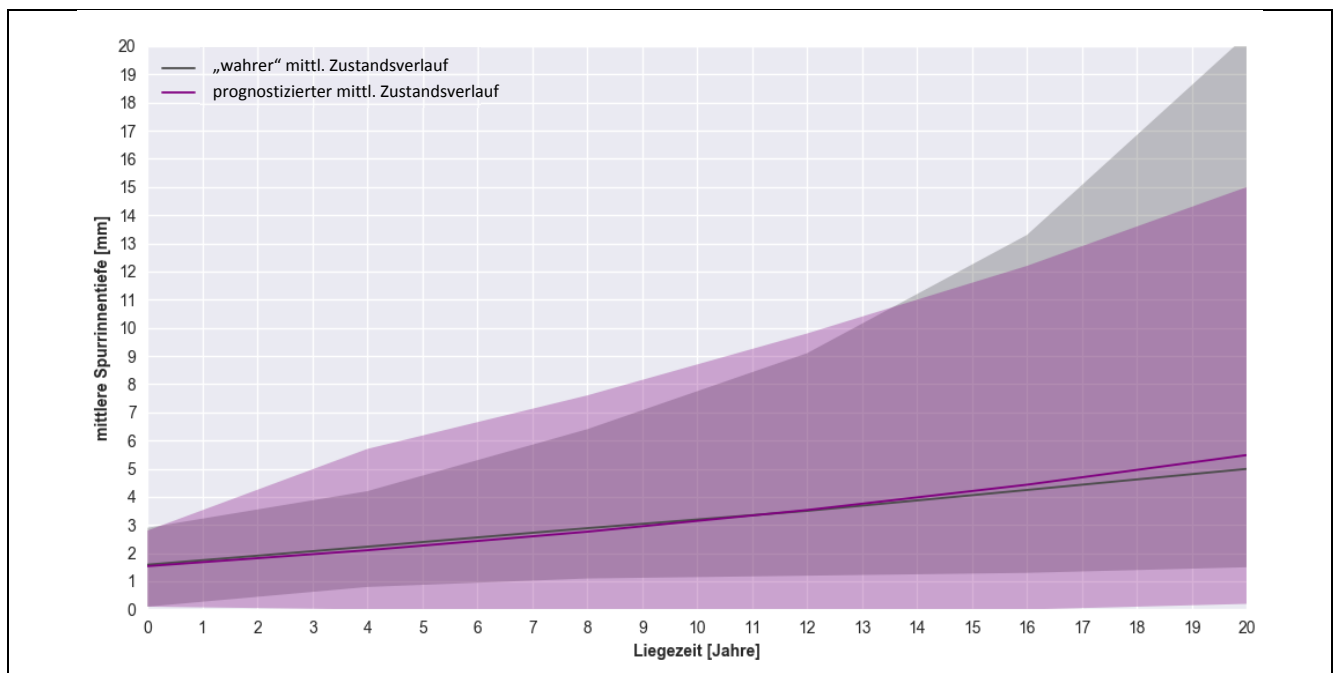


Abbildung 117: Vergleich zwischen prognostiziertem mittleren Zustandsverlauf und „wahrer“ mittleren Zustandsverlauf über eine Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 1

In der Abbildung 118 ist die anhand von Modellvariante 1 prognostizierte Zustandsverteilung des Validierungsdatensatzes nach einer Liegezeit von 20 Jahren dargestellt. Die in grau dargestellten Summenhäufigkeiten zeigen die „wahren“ Zustandsverteilungen bei einer Liegezeit von 0 Jahren und zum Zeitpunkt nach einer Liegezeit von 20 Jahren.

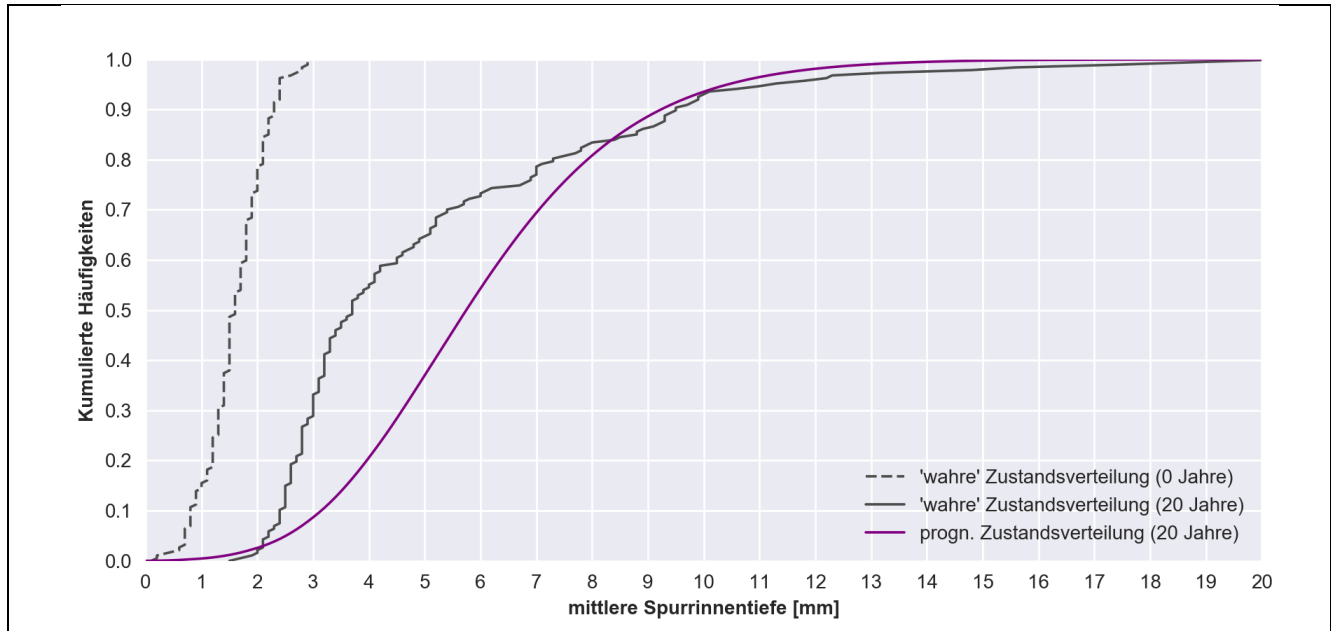


Abbildung 118: Vergleich zwischen prognostizierter Zustandsverteilung und „wahrer“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 1

In der Tabelle 32 sind die statistischen Kenngrößen der „wahren“ und der mit Modellvariante 1 prognostizierten Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 32: Statistische Kenngrößen der „wahren“ und prognostizierten Zustandsverteilung der mittleren Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren für Modellvariante 1

Modellvariante 1	Parameter	„wahrer“ Zustand	prognostizierter Zustand	Differenz
	<i>N</i>	187		
	<i>M</i>	5,0	6,0	+1,0
	<i>SD</i>	3,2	2,0	-1,2
	<i>Max</i>	20,4	16,3	-4,1
	<i>Min</i>	1,5	0,2	-1,3
	95%-Quantil	11,1	10,3	-0,8
	5%-Quantil	2,2	2,5	+0,3

Die prognostizierte Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren weist im Mittel eine mittlere Spurrinnentiefe von 6,0 mm auf ( $N=187$ ). Die zugehörige prognostizierte Standardabweichung beträgt 2,0 mm und liegt damit um 1,2 mm tiefer als die der Zustandsverteilung des Validierungsdatensatzes. Für die maximale mittlere Spurrinnentiefe wurde ein Wert von 16,3 mm prognostiziert. Dieser Wert liegt 4,1 mm unterhalb des tatsächlichen Maximums von 20,4 mm. Die

Differenz zwischen tatsächlichem und prognostiziertem Minimum der mittleren Spurrinnentiefe beträgt 1,3 mm. Die dargestellten Abweichungen zwischen der prognostizierten und der „wahren“ Zustandsverteilung zeigen, dass die anhand von Modellvariante 1 prognostizierten Ergebnisse als nicht zufriedenstellend zu beurteilen sind.

### 7.5.2 Modellvariante 2

Der mit Modellvariante 2 prognostizierte mittlere Zustandsverlauf der mittleren Spurrinnentiefe bildet den aus den Validierungsdaten abgeleiteten „wahren“ mittleren Zustandsverlauf über den gesamten Prognosezeitraum treffend ab. Im Vergleich zu Modellvariante 1 werden die zugehörigen Streuungen besser abgebildet. Obgleich die Streubereiche zu Beginn der Liegezeit analog zu Modellvariante 1 etwas überschätzt werden, wird der vorhandene Streubereich nach einer Liegezeit zwischen 15 und 20 Jahren wesentlich besser abgebildet. Die Abbildung 119 zeigt den Vergleich zwischen dem prognostizierten und „wahren“ mittleren Zustandsverlauf der mittleren Spurrinnentiefe über eine Liegezeit von 20 Jahren. Die farbig schraffierten Flächen zeigen jeweils die  $2\sigma$ -Umgebung des Zustandsverlaufs.

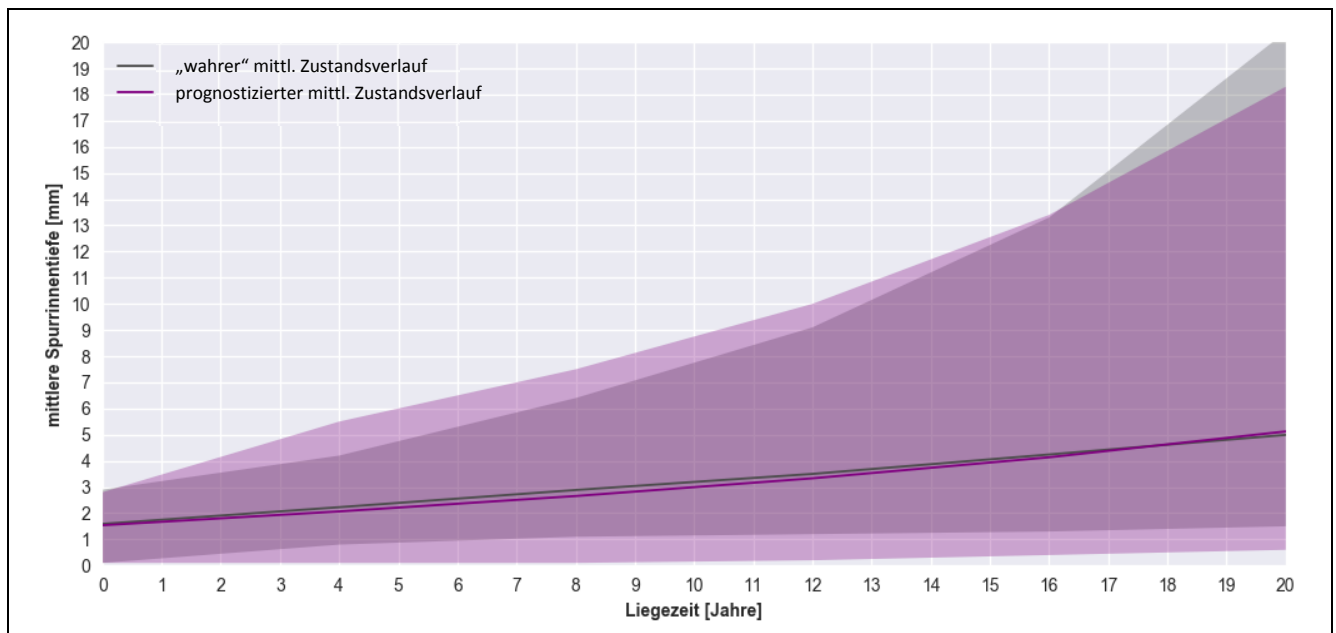


Abbildung 119: Vergleich zwischen prognostiziertem mittleren Zustandsverlauf und „wahrem“ mittleren Zustandsverlauf über einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 2

In der Abbildung 120 ist die anhand von Modellvariante 2 prognostizierte Zustandsverteilung für den Validierungsdatensatz nach einer Liegezeit von 20 Jahren dargestellt.

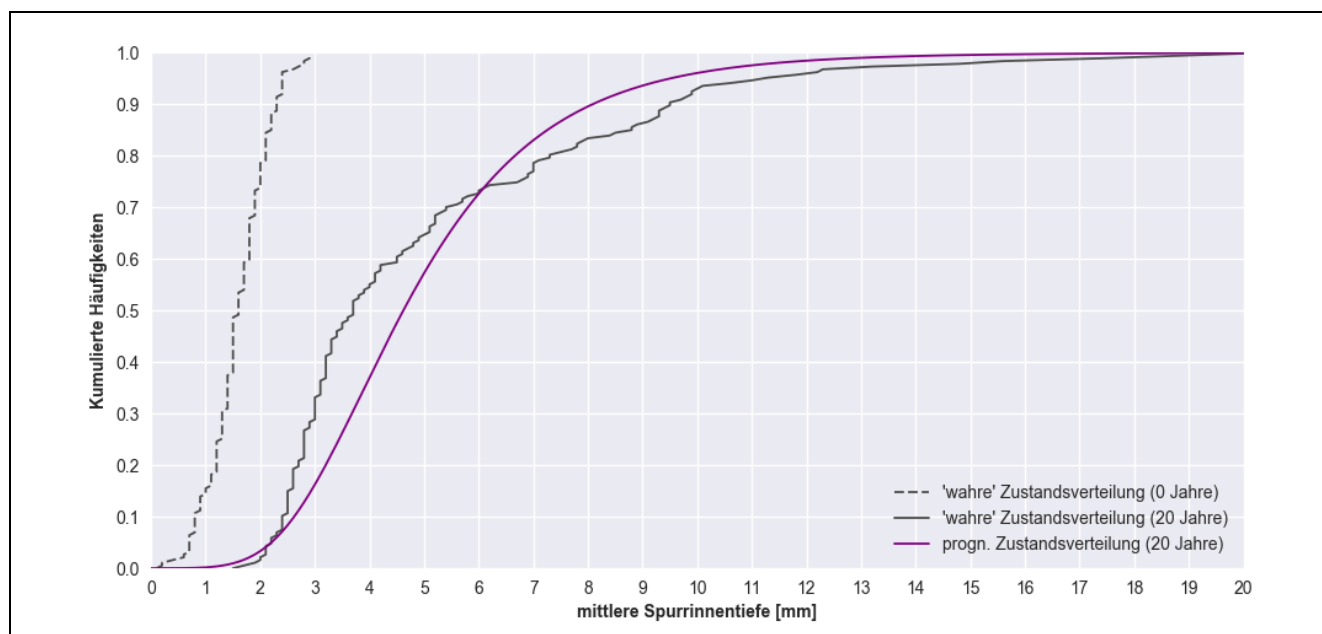


Abbildung 120: Vergleich zwischen prognostizierter Zustandsverteilung und „wahrer“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 2

In der Tabelle 33 sind der Mittelwert und die Standardabweichung der „wahren“ Zustandsverteilung dem Mittelwert und der Standardabweichung der mit Modellvariante 2 prognostizierten Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 33: Statistische Kenngrößen der „wahren“ und prognostizierten Zustandsverteilung der mittleren Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren für Modellvariante 2

Modellvariante 2	Parameter	„wahrer“ Zustand	prognostizierter Zustand	Differenz
	<i>N</i>	187		
	<i>M</i>	5,0	5,1	+0,1
	<i>SD</i>	3,2	1,7	-1,5
	<i>Max</i>	20,4	18,3	-2,1
	<i>Min</i>	1,5	0,6	-0,9
	95-%-Quantil	11,1	9,5	-1,6
	5-%-Quantil	2,2	2,2	0,0

Im Mittel beträgt die prognostizierte mittlere Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren 5,1 mm ( $N=187$ ). Damit liegt sie um ca. 0,1 mm höher im Vergleich zu der „wahren“ Zustandsverteilung des Validierungsdatensatzes. Die Standardabweichung der prognostizierten Zustandsverteilung liegt bei 1,7 mm und differiert im Vergleich zur Zustandsverteilung des Validierungsdatensatzes um 1,5 mm. Bei der maximalen und minimalen mittleren Spurrinnentiefe liegen Abweichungen zwischen den Prognoseergebnissen und den tatsächlichen Zuständen von 2,1 mm bzw. 0,9 mm vor. Im Vergleich zu Modellvariante 1 wird der Anteil an Auswerteabschnitten mit einer mittleren Spurrinnentiefe zwischen 2,0 mm und 9,0 mm besser abgebildet. Allerdings zeigt sich bei Betrachtung der Prognoseergebnisse, dass der Anteil an schlechten Auswerteabschnitten überschätzt wird. Die anhand

von Modellvariante 2 ermittelten Abweichungen zwischen der prognostizierten und der „wahren“ Zustandsverteilung zeigen, dass im Vergleich zu Modellvariante 1 eine bessere Abbildung der „wahren“ Zustandsverteilung möglich ist.

### 7.5.3 Modellvariante 3

Für die Modellvariante 3 wurden die Zustandsverläufe zunächst fahrstreifenspezifisch prognostiziert. Die Stichprobengröße lag hierbei für den Hauptfahrstreifen bei 86 Auswerteabschnitten, bei dem ersten Überholfahrstreifen bei 98 Auswerteabschnitten und bei dem zweiten Überholfahrstreifen bei lediglich drei Auswerteabschnitten, was bei der Bewertung der Prognoseergebnisse zu berücksichtigen ist. Die mit Modellvariante 3 prognostizierten mittleren Zustandsverläufe der mittleren Spurrinnentiefe je Fahrstreifen bilden die „wahren“ aus den Validierungsdaten abgeleiteten Zustandsverläufe treffend ab. In der nachfolgenden Abbildung 121 ist der prognostizierte mittlere Zustandsverlauf der mittleren Spurrinnentiefe je Fahrstreifen über eine Liegezeit von 20 Jahren dargestellt. Die farbig schraffierten Flächen zeigen jeweils die  $2\sigma$ -Umgebung des Zustandsverlaufs.

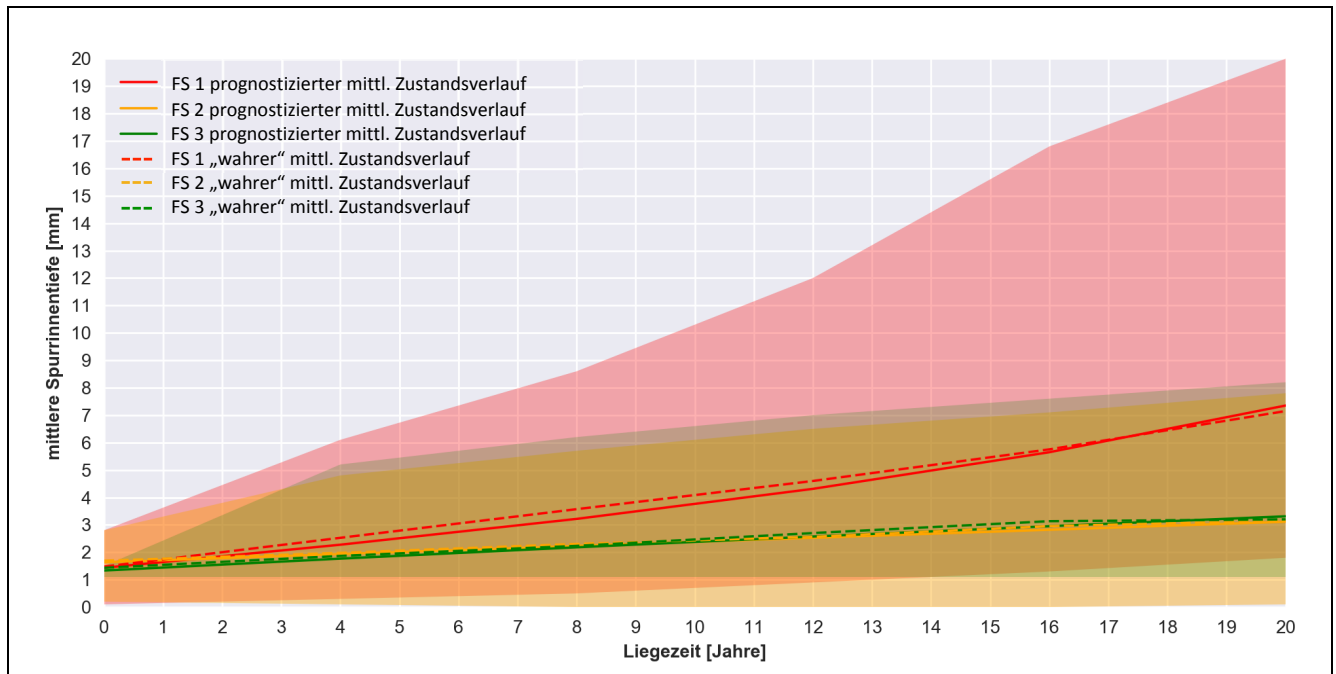


Abbildung 121: Prognostizierte mittlerer Zustandsverlauf je Fahrstreifen über einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 3

In der Abbildung 122 sind die „wahren“ und prognostizierten Zustandsverteilungen für Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise in Abhängigkeit des Fahrstreifens dargestellt.



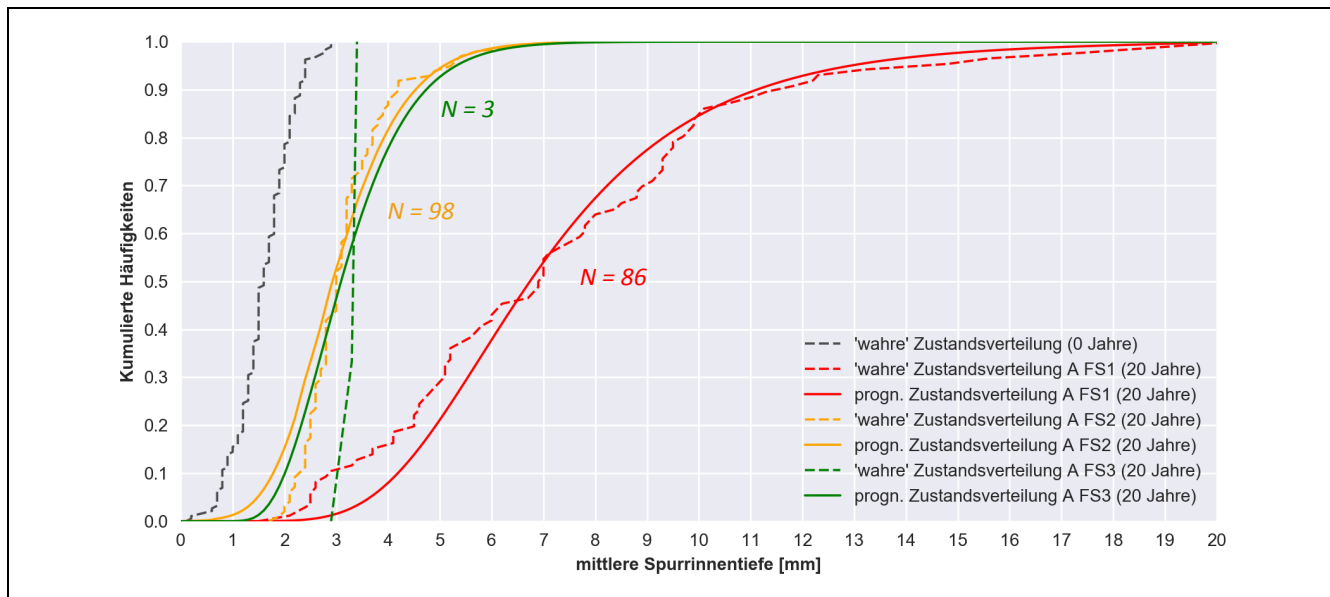


Abbildung 122: Vergleich zwischen den prognostizierten Zustandsverteilungen und den „wahren“ Zustandsverteilungen nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 3

In der Tabelle 34 sind die statistischen Kenngrößen für die „wahren“ und die prognostizierten Zustandsverteilungen in Abhängigkeit der Fahrstreifennummer tabellarisch zusammengefasst.

Die Prognoseergebnisse ( $N=86$ ) für den Hauptfahrstreifen zeigen, dass die Abweichungen zwischen „wahrem“ und prognostiziertem Mittelwert bei 0,1 mm liegen. Die zugehörige Standardabweichung wird durch das Modell um 2,3 mm unterschätzt. Die Abweichungen bezüglich der maximalen mittleren Spurrinnentiefe liegen bei 0,4 mm und bei der minimalen mittleren Spurrinnentiefe bei 0,3 mm.

Die Zustandsprognose für den ersten Überholfahrstreifen liefert vergleichbar gute Ergebnisse ( $N=98$ ) wie die des Hauptfahrstreifens. Hierbei beträgt die Abweichung des Mittelwertes ebenfalls lediglich 0,1 mm. Die Standardabweichung der prognostizierten Zustandsverteilung wird für den ersten Überholfahrstreifen mit einer Abweichung von 0,4 mm deutlich besser vorhergesagt. Bei der Prognose der maximalen und minimalen mittleren Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren liefert das Modell für den ersten Überholfahrstreifen Abweichungen von 0,5 mm bzw. 1,6 mm in Bezug auf die „wahre“ Zustandsverteilung des Validierungsdatensatzes.

Tabelle 34: Statistische Kenngrößen der „wahren“ und prognostizierten Zustandsverteilungen der mittleren Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren für Modellvariante 3

Modellvariante 3	Teilmodell	Parameter	„wahrer“ Zustand	prognostizierter Zustand	Differenz
	FS 1	<i>N</i>	86		
		<i>M</i>	7,2	7,3	+0,1
		<i>SD</i>	3,5	1,2	-2,3
		<i>Max</i>	20,4	20,0	-0,4
		<i>Min</i>	1,5	1,8	+0,3
		95-%-Quantil	15,0	13,1	-1,9
		5-%-Quantil	2,5	3,7	+1,2
	FS 2	<i>N</i>	98		
		<i>M</i>	3,2	3,1	-0,1
		<i>SD</i>	0,9	0,5	-0,4
		<i>Max</i>	7,8	7,3	-0,5
		<i>Min</i>	0,1	1,7	+1,6
		95-%-Quantil	5,3	5,2	-0,1
		5-%-Quantil	2,1	1,5	-0,6
	FS 3	<i>N</i>	3		
		<i>M</i>	3,2	3,3	+0,1
		<i>SD</i>	0,2	0,4	+0,2
		<i>Max</i>	3,4	8,2	+4,8
		<i>Min</i>	2,9	1,1	-1,8
		95-%-Quantil	3,3	5,3	+2,0
		5-%-Quantil	3,1	1,8	-1,3

Der Vergleich der Prognoseergebnisse mit der „wahren“ Zustandsverteilung des zweiten Überholfahrstreifens ergibt eine Abweichung der gemittelten mittleren Spurrinnentiefe von 0,1 mm. Die vorhandene Standardabweichung von 0,2 mm konnte mit einem Wert von 0,4 mm abgeschätzt werden. Bei den maximalen und minimalen mittleren Spurrinnentiefen sind hingegen größere Abweichungen festzustellen, welche jedoch durch die sehr geringe Stichprobengröße ( $N=3$ ) des Validierungsdatensatzes bedingt sind.

Der über alle Fahrstreifen gemittelte Zustandsverlauf der mittleren Spurrinnentiefe wird mit Modellvariante 3 sehr gut wiedergegeben. Die zugehörigen Streubereiche werden über den gesamten Prognosezeitraum überschätzt, sodass die maximal zu beobachtende mittlere Spurrinnentiefe um etwa 2,0 mm überschätzt wird. Bei einer Liegezeit von 20 Jahren wird der vorhandene Streubereich hinge-

gen treffend prognostiziert. Die Abbildung 123 zeigt den Vergleich zwischen dem prognostizierten und „wahren“ mittleren Zustandsverlauf der mittleren Spurrinnentiefe über eine Liegezeit von 20 Jahren.

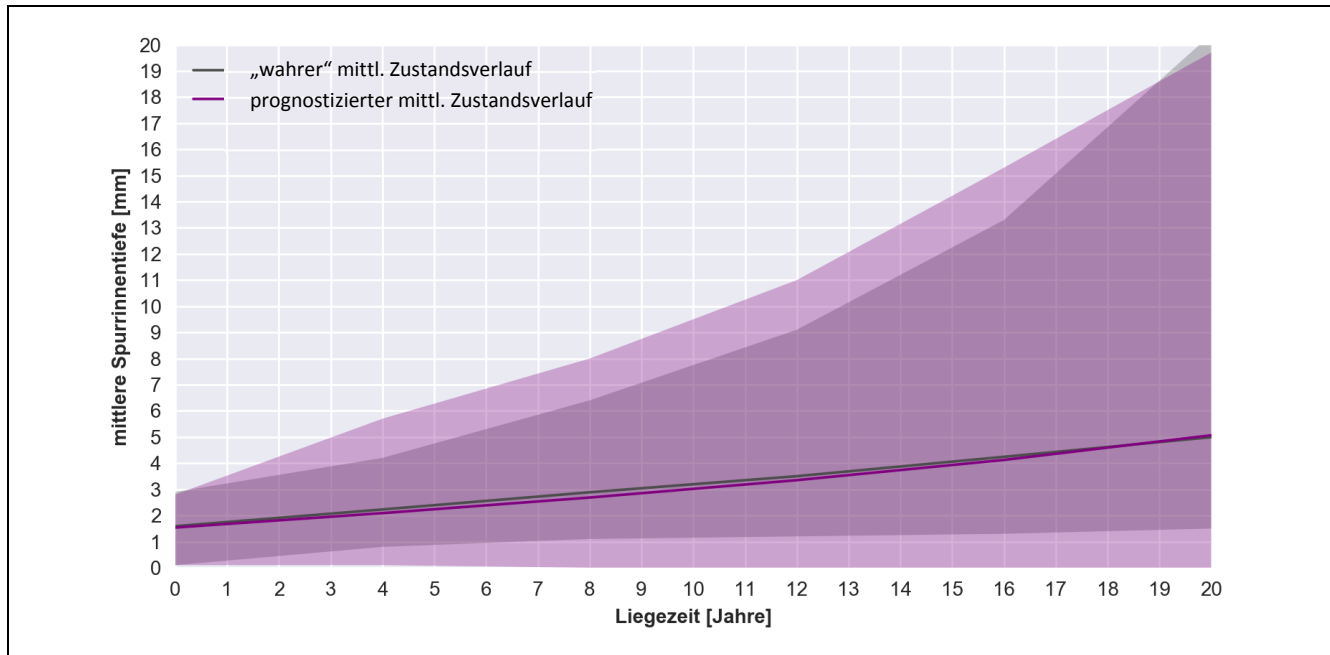


Abbildung 123: Vergleich zwischen prognostiziertem mittleren Zustandsverlauf und „wahrem“ mittleren Zustandsverlauf über einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 3

Für den Vergleich der Zustandsverteilungen aller Auswerteabschnitte werden die je nach Fahrstreifen prognostizierten Zustandsverteilungen nach einer Liegezeit von 20 Jahren zunächst zu einer Gesamtverteilung zusammengesetzt. Dies erfolgt durch eine Faltung der Verteilungen mit ihren Anteilen an der Gesamtlänge entsprechender Gewichtung aller Validierungsdatensätze der DMS. Die prognostizierte Gesamtverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren ist in der Abbildung 124 dargestellt.

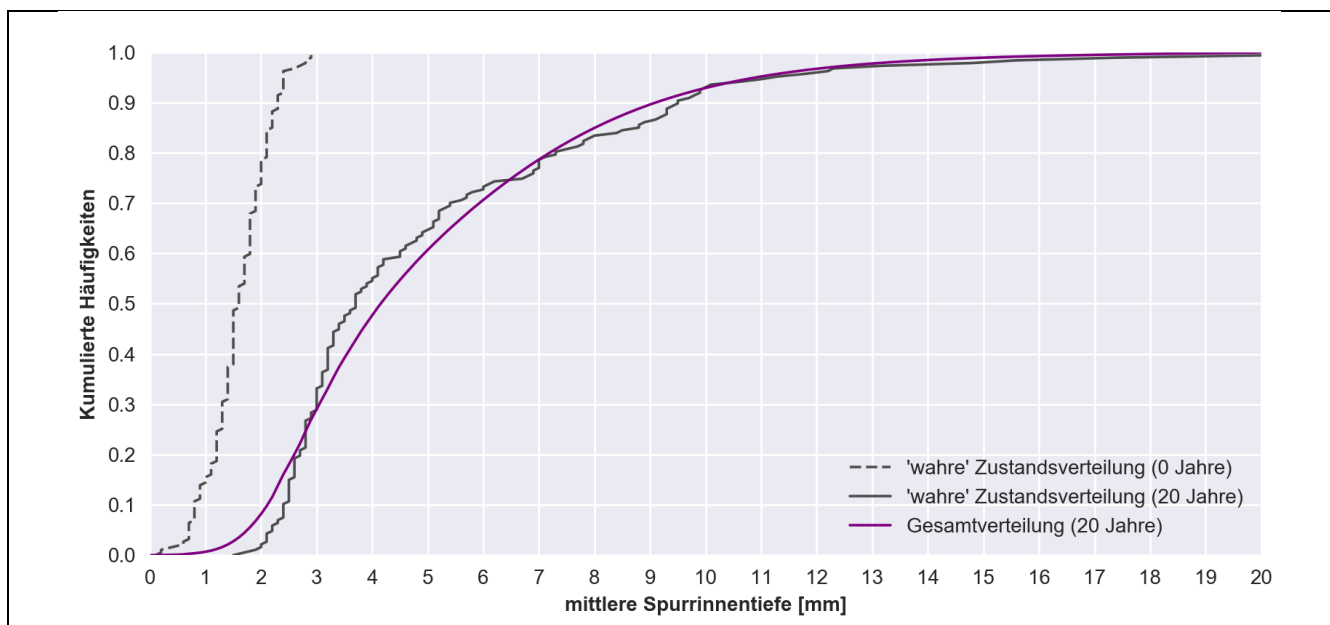


Abbildung 124: Vergleich zwischen der prognostizierten Gesamtverteilung und der „wahren“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit Modellvariante 3

Die Tabelle 35 fasst die „wahren“ und die mit Hilfe von Modellvariante 3 prognostizierten statistischen Kenngrößen der Zustandsverteilungen für die mittlere Spurrinnentiefe zusammen.

Tabelle 35: Statistische Kenngrößen der „wahren“ und prognostizierten Gesamtverteilung der mittleren Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren für Modellvariante 3

Modellvariante 3	Parameter	„wahrer“ Zustand	prognostizierter Zustand	Differenz
	<i>N</i>	187		
	<i>M</i>	5,0	5,0	0,0
	<i>SD</i>	3,2	2,6	-0,6
	<i>Max</i>	20,4	19,7	-0,7
	<i>Min</i>	1,5	0,0	-1,5
	95-%-Quantil	11,1	11,1	0,0
	5-%-Quantil	2,2	1,8	- 0,7

Die mittlere Spurrinnentiefe über alle Auswerteabschnitte nach einer Liegezeit von 20 Jahren beträgt im Validierungsdatensatz 5,0 mm. Dieser mittlere Zustand wird anhand des vorgestellten Modells treffend prognostiziert. Die Standardabweichung der mittleren Spurrinnentiefe beträgt hierbei 3,2 mm. Mit Hilfe des Modells wurde eine Standardabweichung von 2,6 mm ermittelt. In Bezug auf die maximalen und minimalen Spurrinnentiefen sind zwischen den tatsächlichen und den prognostizierten Spurrinnentiefen Abweichungen von 0,7 mm bzw. 1,5 mm festzustellen.

Die geringen Abweichungen bei den statistischen Kenngrößen als auch die Abbildung der Verteilungsform zeigen, dass die Modellvariante 3, die anhand von der kalman-gefilterten Datengrundlage und mit einer Differenzierung nach Fahrstreifen entwickelt wurde, die Zustandsentwicklung aller Auswerteabschnitte über eine Liegezeit von 20 Jahren treffend abbildet. Es zeigte sich jedoch ebenfalls, dass die nach 20 Jahren vorzufindende Zustandsverteilung eine ausgeprägte Streuung aufweist, die für die Prognose eines einzelnen Auswerteabschnittes unzureichend ist. Diese Streuung kann nur durch das Einbeziehen weiterer auswerteabschnittspezifischer Informationen verringert werden. Dazu sind neben der Liegezeit, der Bauweise und der Verkehrsbelastung insbesondere die material- und einbauspezifischen Eigenschaften miteinzubeziehen.

## 7.6 Vergleich des Modells mit deterministischen Verhaltensfunktionen im PMS

Im Folgenden findet abschließend ein Vergleich des entwickelten probabilistischen Modells (Modellvariante 3) mit den bisherigen deterministischen Verhaltensfunktionen statt. Dazu wird die deterministische abschnittsbezogene Zustandsprognose sowohl mit dem in den RPE-Stra 01 beschriebenen Verfahren der Koeffizientenanpassung als auch mit dem alternativen innerhalb des PMS verwendeten Curve-Shifting-Verfahrens angewendet (vgl. Kapitel 2.6.4).

Der Vergleich der deterministischen mit dem probabilistischen Verfahren erfolgt, gemäß der in den Richtlinien enthaltenen Vorgehensweise, auf der Basis von Zustandswerten. Zwar würde eine Gegenüberstellung der Verfahren anhand von Zustandsgrößen den bekannten Verzerrungseffekt des Normierungsverfahrens vermeiden, jedoch ist hierzu auch eine abgesicherte Anpassung der Verhaltensfunktionen in den RPE-Stra 01 notwendig. Die Forschungsergebnisse aus bisherigen Untersuchungen

[Hinsch et al. 2005; Oertelt 2007] können aufgrund von differierenden Randbedingungen (Parametrisierung auf Basis von 10-t-Achsübergängen, Anwendung auf Bundesstraßen etc.) nicht ohne Weiteres auf den vorliegenden Anwendungsfall übertragen werden. Daher werden die Zustandsgrößen bei dem probabilistischen Verfahren zunächst in Zustandswerte nach dem in den ZTV ZEB-StB [2018] enthaltenen Normierungsverfahren (vgl. Kapitel 2.6) transformiert.

### 7.6.1 Zustandsprognose mittels Koeffizientenanpassung

Anhand des zuletzt erfassten Messergebnisses wurde für jeden 100-m-Auswerteabschnitt die Verhaltensklasse ermittelt und anschließend die Verhaltensfunktion mittels der Koeffizientenanpassung kalibriert. Die Ergebnisse der deterministischen Prognose nach einer Liegezeit von 20 Jahren sind in der Tabelle 36 abgebildet.

Tabelle 36: Statistische Kenngrößen der „wahren“ und prognostizierten Zustandsverteilung für die Zustandswerte der mittleren Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem Verfahren „Koeffizientenanpassung“

Koeffizientenanpassung	Parameter	„wahrer“ Zustand	prognostizierter Zustand	Differenz
	<i>N</i>	152		
	<i>M</i>	2,24	2,35	+0,11
	<i>SD</i>	0,69	0,77	+0,08
	<i>Max</i>	4,39	4,58	+0,19
	<i>Min</i>	1,48	1,42	-0,06
	95-%-Quantil	3,59	3,81	+0,22
	5-%-Quantil	1,56	1,55	-0,01

Die „wahren“ Zustandswerte nach einer Liegezeit von 20 Jahren variieren zwischen 1,48 und 4,39 Zustandsnoten. Im Mittel beträgt der Zustand 2,24 mit einer Standardabweichung von 0,69 Zustandsnoten. Die deterministische Prognose liefert einen mittleren Zustandswert von 2,34 mit einer Standardabweichung von 0,77. Insgesamt variieren die prognostizierten Zustandswerte zwischen 1,42 und 4,58. Die mittlere Abweichung zwischen „wahren“ und prognostizierten Zustandswerten beträgt -0,11 Zustandsnoten mit einer zugehörigen Standardabweichung von 0,32 Zustandsnoten. In der Abbildung 125 sind die nach den RPE-Stra 01 ermittelte auf Zustandswerten basierenden Zustandsverteilungen der mittleren Spurrinnentiefe dargestellt.

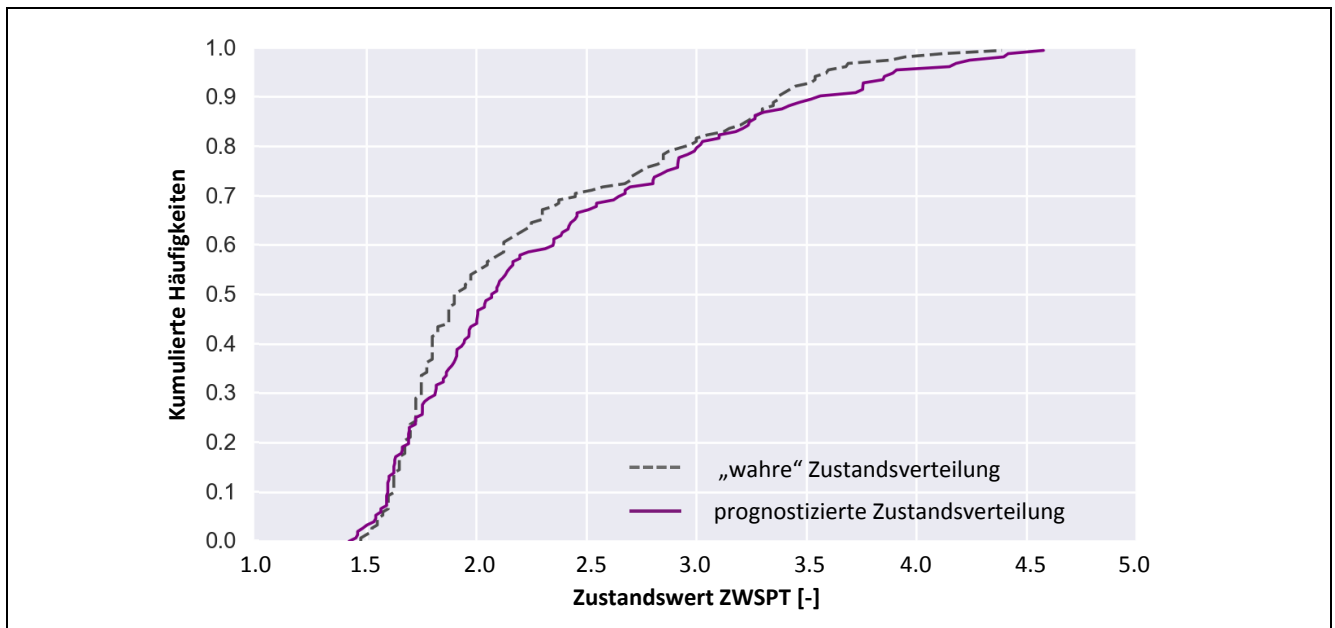


Abbildung 125: Vergleich zwischen der prognostizierten Gesamtverteilung und der „wahren“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem Verfahren „Koeffizientenanpassung“

Ein Vergleich zwischen den prognostizierten und „wahren“ Zustandswerten zeigt, dass die Abweichungen im Mittel nur um 0,09 Zustandsnoten mit einer Standardabweichung von 0,29 Zustandsnoten voneinander differieren. Die Korrelation zwischen „wahren“ und prognostizierten Zuständen liefert mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,924 einen sehr guten Zusammenhang. Die maximale Abweichung zwischen Modell und „wahren“ Werten liegt bei 0,99 Zustandsnoten (vgl. Abbildung 126).

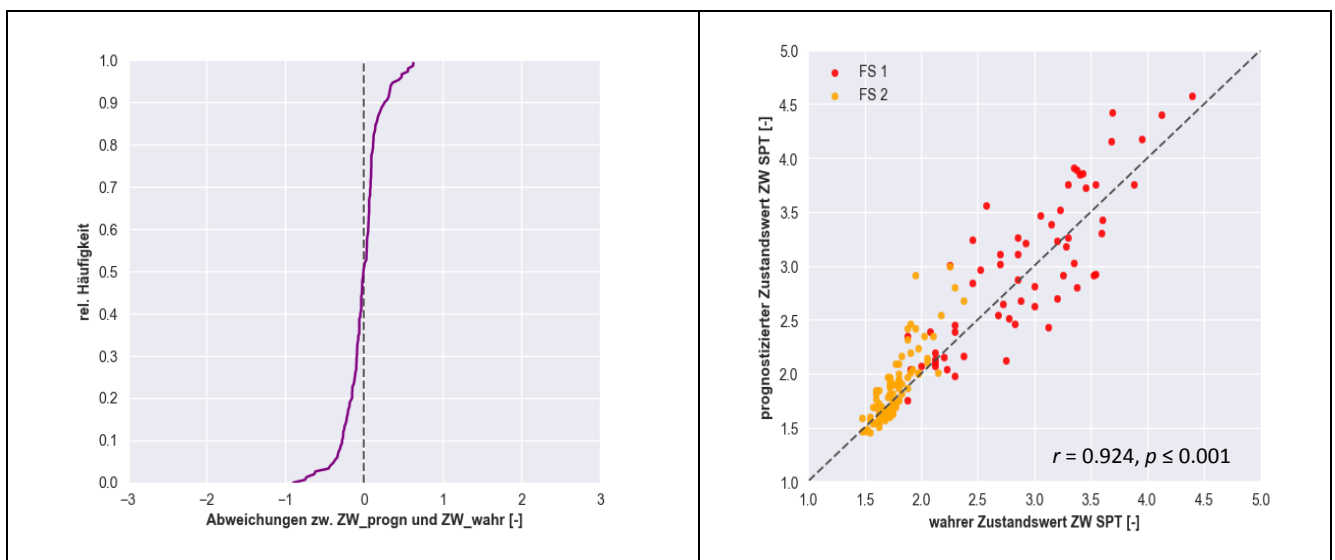


Abbildung 126: Abweichungen zwischen den prognostizierten und den „wahren“ Zustandswerten nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem Verfahren „Koeffizientenanpassung“

## 7.6.2 Zustandsprognose mittels Curve-Shifting-Verfahren

Die Zustandsprognose mit dem Curve-Shifting-Verfahren ergibt eine Variation der Zustandswerte zwischen 1,33 und 4,66 Zustandsnoten. Der mittlere Zustandswert der mittleren Spurrinnentiefe nach 20 Jahren beträgt 2,39 mit einer Standardabweichung von 0,74. Die deskriptiven Werte sind in Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37: Statistische Kenngrößen der „wahren“ und prognostizierten Zustandsverteilung für die Zustandswerte der mittleren Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem Curve-Shifting-Verfahren

Curve-Shifting-Verfahren	Parameter	„wahrer“ Zustand	prognostizierter Zustand	Differenz
	<i>N</i>	152		
	<i>M</i>	2,24	2,39	+0,15
	<i>SD</i>	0,69	0,74	+0,05
	<i>Max</i>	4,39	4,66	+0,27
	<i>Min</i>	1,48	1,33	-0,15
	95-%-Quantil	3,59	3,78	+0,19
	5-%-Quantil	1,56	1,63	+0,07

Im Mittel betragen die Abweichungen zwischen „wahren“ und prognostizierten Zustandswerten -0,11 Zustandsnoten mit einer zugehörigen Standardabweichung von 0,33 Zustandsnoten. Der Vergleich zwischen prognostizierten und „wahren“ Zustandswerten ist in der Abbildung 127 grafisch dargestellt.

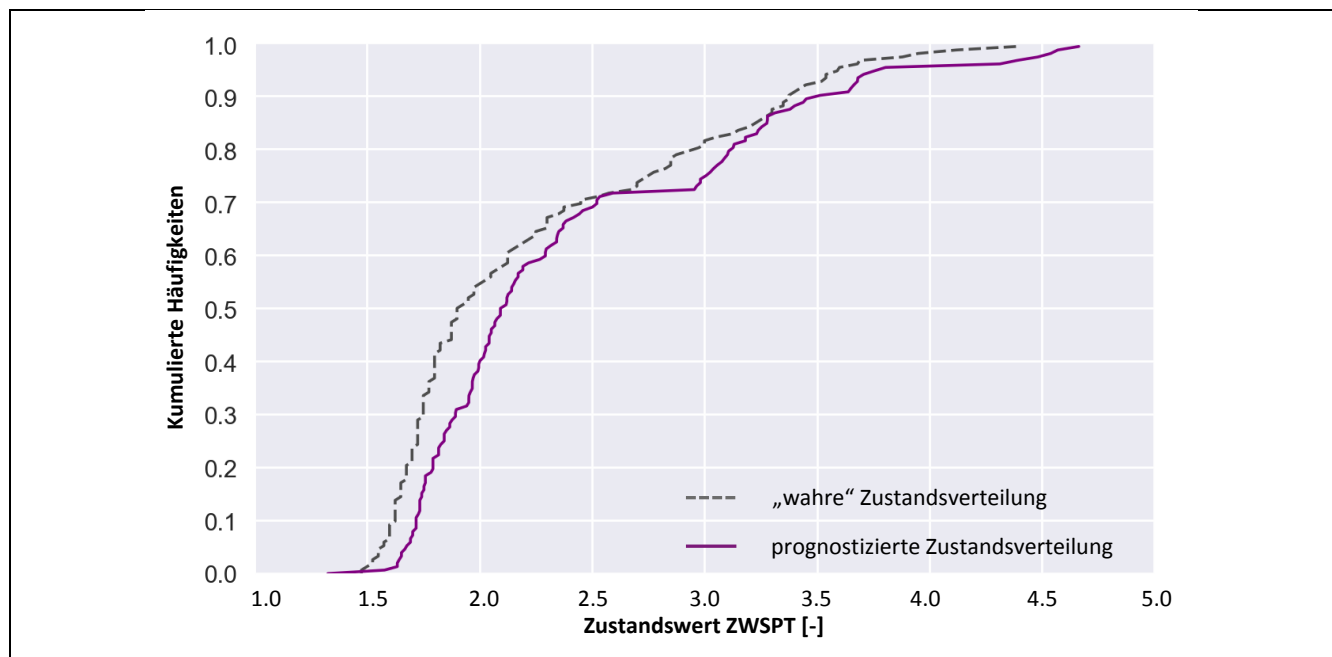


Abbildung 127: Vergleich zwischen der prognostizierten Gesamtverteilung und der „wahren“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem Curve-Shifting-Verfahren

Die prognostizierten Zustandswerte liegen mit dem Curve-Shifting-Verfahren im Mittel um 0,14 Zustandsnoten höher im Vergleich zu den „wahren“ Zustandswerten. Dies wird vor allem durch eine Überschätzung der Zustandsverschlechterung für die Auswerteabschnitte des Überholfahrstreifens

hervorgerufen. Die Abweichungen zwischen prognostizierten und „wahren“ Zustandswerten variieren zwischen 0,78 und -1,10 Zustandsnoten. Die Korrelation zwischen „wahren“ und prognostizierten Zuständen liefert mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,918 eine etwas schlechtere Übereinstimmung im Vergleich zu dem Verfahren der Koeffizientenanpassung. Die ermittelten Abweichungen sind in der Abbildung 128 dargestellt.

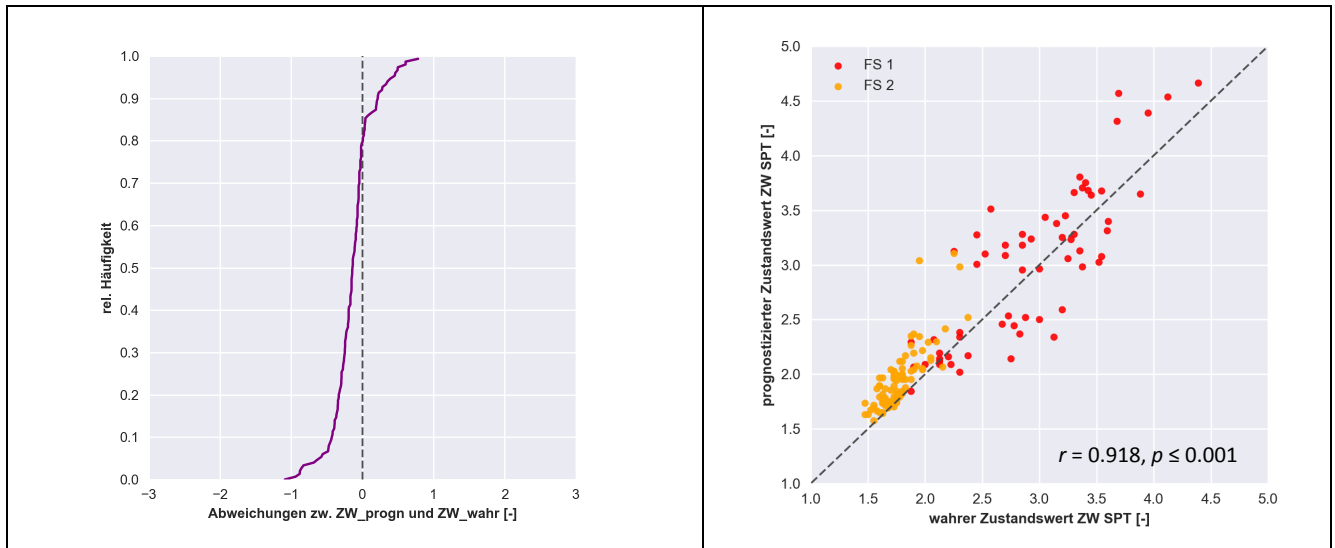


Abbildung 128: Abweichungen zwischen den prognostizierten und den „wahren“ Zustandswerten nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem Curve-Shifting-Verfahren

### 7.6.3 Zustandsprognose mit dem probabilistischen Modell

Analog zur Anwendung der deterministischen Verhaltensfunktionen wird im Folgenden das entwickelte probabilistische Prognosemodell (Modellvariante 3) auf den Validierungsdatensatz angewendet. Für die Anwendung des Modells wurden je Auswerteabschnitt die folgenden Arbeitsschritte durchgeführt:

1. Ermittlung der Liegezeit
2. Erstellung einer Zeitreihe anhand der vorliegenden Ergebnisse der ZEB-Kampagnen
3. Prognose des Zustandes mit Hilfe des Modells bis zum Zeitpunkt des Messergebnisses
4. Faltung der prognostizierten Zustandsverteilung mit der Verteilung des Messergebnisses zu einer geschätzten Zustandsverteilung
5. Wiederholung der Schritte 3 und 4 bis alle Messergebnisse innerhalb der Zeitreihe berücksichtigt sind
6. Prognose des Zustandes mit Hilfe des Modells über den verbleibenden Prognosezeitraum
7. Ausgabe der Zustandsverteilung zum Ende des Prognosezeitraums

In der Abbildung 129 ist die Anwendung des entwickelten probabilistischen Prognosemodells auf einen 100-m-Auswerteabschnitt exemplarisch dargestellt. In grün ist zunächst die gemessene mittlere Spurrinnentiefe inklusive ihrer Messunsicherheit zum letzten Messzeitpunkt dargestellt. Die zu diesem Messzeitpunkt prognostizierte Zustandsverteilung ist in blau abgebildet. Aus der Kombination dieser beiden Zustandsverteilungen entsteht die rot dargestellte, neu geschätzte Zustandsverteilung, die anschließend als Ausgangsbasis für die weiteren Prognoseschritte dient.



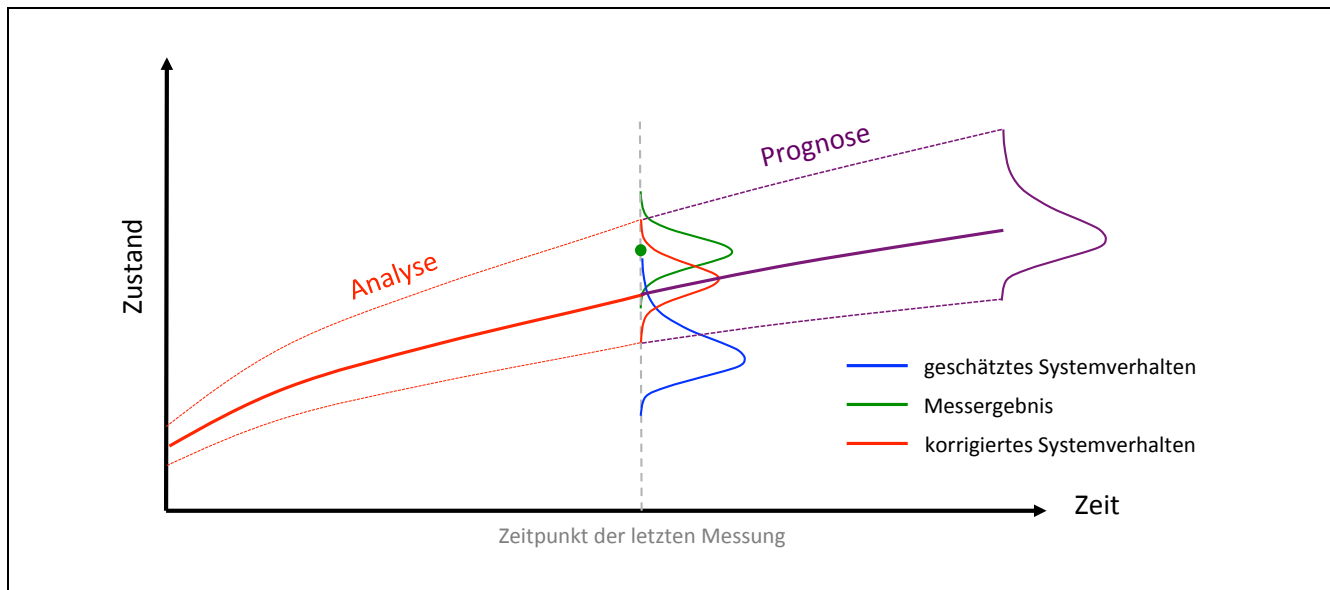


Abbildung 129: Exemplarische Anwendung der entwickelten probabilistischen Prognosemethode auf einen 100-m-Auswerteabschnitt

Die statistischen Kenngrößen der mit dem Modell prognostizierten und der „wahren“ Zustandsverteilung sind in der Tabelle 38 dargestellt.

Tabelle 38: Statistische Kenngrößen der „wahren“ und prognostizierten Zustandsverteilung für die Zustandswerte der mittleren Spurrinnentiefe nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem probabilistischen Modell

Probabilistisches Verfahren	Parameter	„wahrer“ Zustand	prognostizierter Zustand	Differenz
	<i>N</i>	152		
	<i>M</i>	2,24	2,26	+0,02
	<i>SD</i>	0,69	0,69	0,00
	<i>Max</i>	4,39	3,91	-0,48
	<i>Min</i>	1,48	1,47	-0,01
	95-%-Quantil	3,59	3,60	+0,01
	5-%-Quantil	1,56	1,54	-0,02

Die Anwendung des Modells auf die Daten ergibt eine Variation der Zustandswerte zwischen 1,47 und 3,91 Zustandsnoten. Im Mittel beträgt der prognostizierte Zustandswert der mittleren Spurrinnentiefe nach 20 Jahren 2,26 Zustandsnoten mit einer Standardabweichung von 0,69 Zustandsnoten. Im Mittel betragen die Abweichungen zwischen „wahren“ und prognostizierten Zustandswerten -0,02 Zustandsnoten mit einer zugehörigen Standardabweichung von 0,24 Zustandsnoten. Die anhand der 5-%- und 95-%-Quantile quantifizierten Randbereiche der Verteilung werden mit nur geringen Abweichungen von -0,02 bzw. +0,01 abgebildet. Der Vergleich zwischen prognostizierten und „wahren“ Zustandswerten ist in der Abbildung 130 grafisch dargestellt.

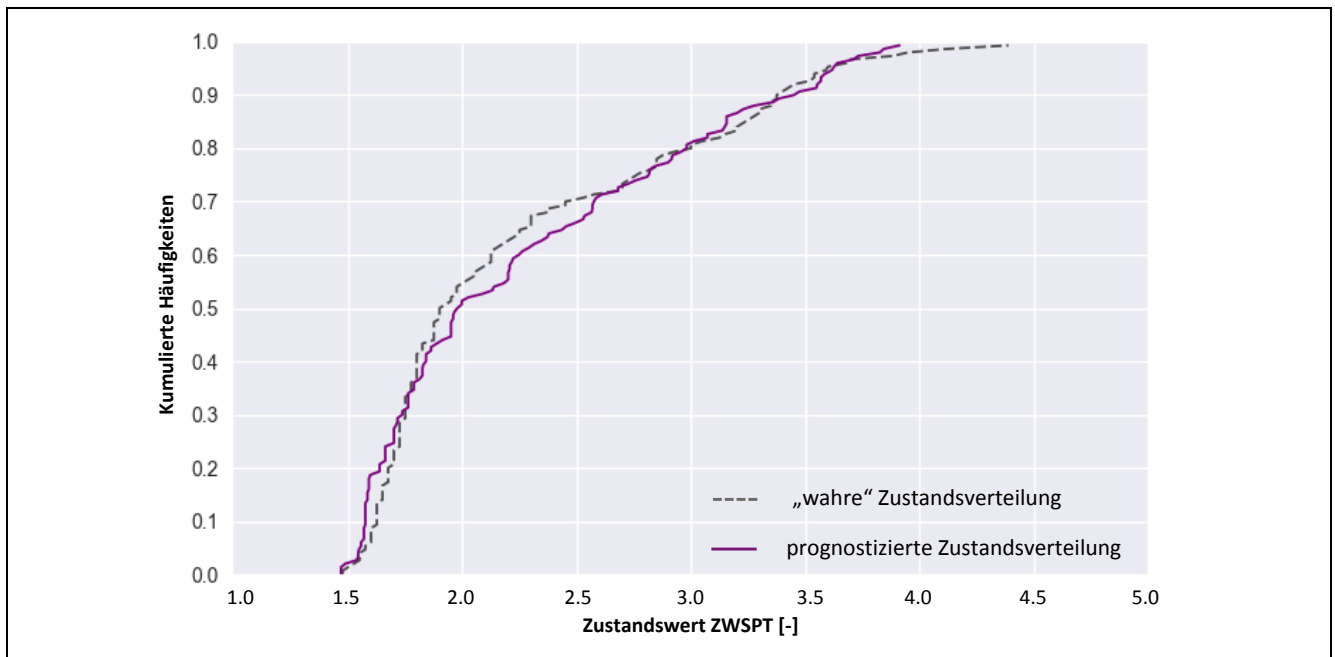


Abbildung 130: Vergleich zwischen der prognostizierten Gesamtverteilung und der „wahren“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem probabilistischen Modell

Die Abweichungen folgen einer Normalverteilung, sodass eine systematische Über- oder Unterschätzung von Zustandswerten nicht festgestellt werden kann. Die maximale Abweichung liegt bei 0,9 Zustandsnoten. Die Korrelation zwischen „wahren“ und prognostizierten Zuständen liefert mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,941 einen sehr guten Zusammenhang. Die Abweichungen zwischen Prognose und „wahren“ Werten sind in der Abbildung 131 dargestellt.

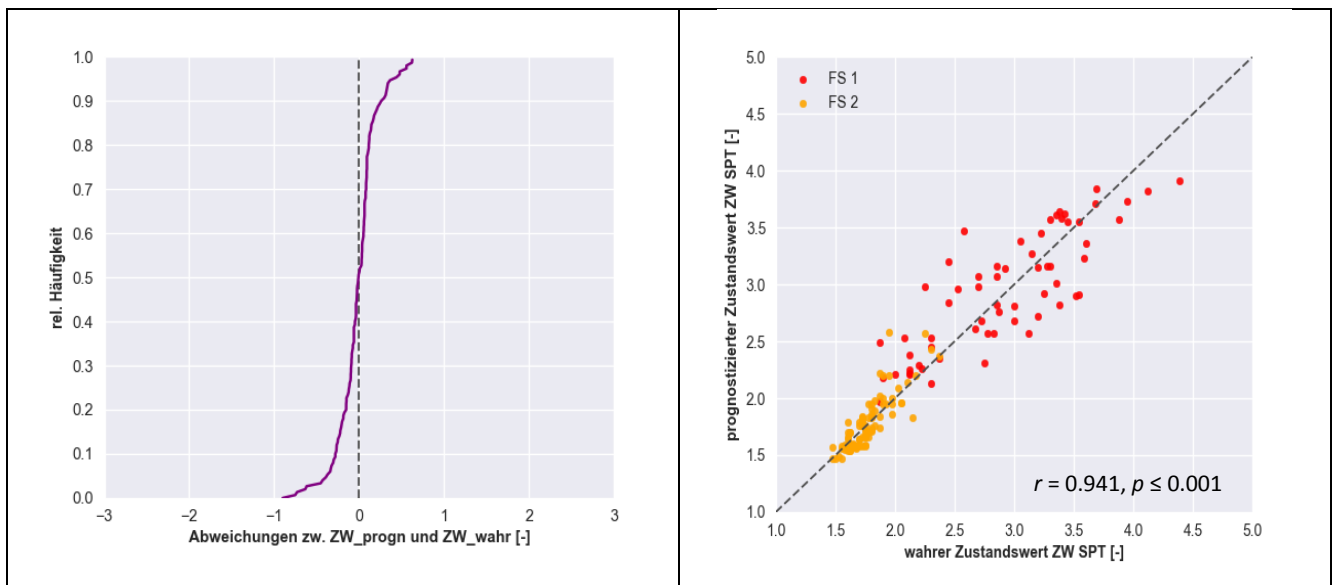


Abbildung 131: Abweichungen zwischen den prognostizierten und den „wahren“ Zustandswerten nach einer Liegezeit von 20 Jahren mit dem probabilistischen Modell

---

## 7.7 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel erfolgten die Entwicklung und Validierung eines probabilistischen Prognosemodells. Die verwendete Datengrundlage wurde zunächst in einen Entwicklungs- und Validierungsdatensatz mit Hilfe eines zufallsbasierten Auswahlverfahrens separiert. Für die Verwendung der Daten wurden diese anschließend in Abhängigkeit der Modellvariante mit Hilfe eines Kalman-Filters aufbereitet. Anschließend wurden drei verschiedene Modellvarianten entwickelt. Für die Parametrisierung von Modellvariante 1 wurden nicht aufbereitete Zustandsdaten verwendet und Zustandsverbesserungen anhand des in Kapitel 3 kritisierten Verfahrens aus dem Datensatz ausgeschlossen. Die zweite und dritte Modellvariante basierten hingegen auf mit Hilfe eines Kalman-Filters aufbereiteten Zustandsdaten. In Bezug auf die anhand von Wachstumskurvenmodellen ermittelten Abhängigkeiten zwischen Schwerverkehrsbelastung und Zustandsentwicklung (vgl. Kapitel 6), erfolgte im Rahmen von Modellvariante 3 weiterhin eine Differenzierung nach dem Fahrstreifen.

Da im vorliegenden Datensatz keine Auswerteabschnitte in Betonbauweise mit einer Liegezeit von mindestens 20 Jahren vorlagen, konnte eine Validierung der Modellvarianten nur für Auswerteabschnitte in Asphaltbauweise durchgeführt werden. Die Prognoseergebnisse je Modellvariante wurden der „wahren“ Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren des Validierungsdatensatz vergleichend gegenübergestellt.

Im Ergebnis ist zu erkennen, dass durch eine Aufbereitung der Zustandsdaten mit Hilfe eines Kalman-Filters eine wesentlich bessere Abschätzung der Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren erfolgen konnte. Im Vergleich zu den nicht aufbereiteten Zustandsdaten (Modellvariante 1) konnte mit dem Kalman-Filter (Modellvariante 2) die Abweichung zwischen dem „wahren“ und dem prognostizierten Mittelwert von 1,0 mm auf 0,1 mm reduziert werden. Die zugehörige Standardabweichung lieferte bei beiden Modellvarianten vergleichbare Ergebnisse mit einer Abweichung zu den „wahren“ Werten von 1,2 mm bzw. 1,5 mm. Neben einer verbesserten Prognose ermöglicht die Aufbereitung der Daten eine deutlich umfangreichere Datengrundlage für die Erstellung der Übergangsmatrizen. Nach der durchgeführten Datenaufbereitung wiesen nur noch etwa 5 % aller Auswerteabschnitte eine Zustandsverbesserung auf, wohingegen bei Modellvariante 1 etwa 50 % der Datengrundlage aufgrund von gemessenen Zustandsverbesserungen verworfen wurde. Eine vergrößerte Datengrundlage ermöglicht eine wesentlich bessere Modellierung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen innerhalb der Übergangsmatrix.

Anhand einer Differenzierung der Zustandsänderungen in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung (Modellvariante 3) konnten die fahrstreifenbezogenen Zustandsverteilungen sowie die über alle Auswerteabschnitte zusammengesetzte Zustandsverteilung mit hoher Genauigkeit vorhergesagt werden. Die Abweichung des Mittelwertes zwischen wahrer und prognostizierter Zustandsverteilung beträgt hierbei 0,0 mm. Die zugehörige Standardabweichung wurde zu 2,6 mm prognostiziert, wohingegen die Standardabweichung der „wahren“ Zustandsverteilung einen Wert von 3,2 mm annimmt. Eine Verfeinerung des Prognoseinstrumentariums kann anhand der Berücksichtigung von weiteren Einflussfaktoren in das Modell erfolgen. Dadurch können mehr Teilgruppen gebildet werden, mit dem Ziel die Streuung der prognostizierten Zustandsverteilung weiter zu verringern.

Im Hinblick auf eine zukünftige Anwendung der Methodik im Rahmen des PMS wurde das entwickelte Modell weiterhin mit den bisher verwendeten deterministischen Prognosefunktionen verglichen. Dieser Vergleich der Prognoseergebnisse erfolgte aufgrund der Charakteristika der im PMS verwendeten Verhaltensfunktionen auf der Basis von Zustandswerten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen,

---

dass das probabilistische Prognosemodell für den Mittelwert vergleichbare Prognoseergebnisse wie das in den RPE-Stra 01 enthaltene Verfahren der Koeffizientenanpassung liefert. Das ebenfalls verglichene, alternative Curve-Shifting-Verfahren, welches derzeit in PMS Anwendung findet, lieferte hingegen im direkten Vergleich die größten Abweichungen zwischen prognostizierten und „wahren“ Zustandswerten. Die Korrelationskoeffizienten zwischen „wahren“ und prognostizierten Zustandswerten zeigten sowohl bei den deterministischen als auch bei dem probabilistischen hohe Übereinstimmungen. Für das in dieser Arbeit entwickelte probabilistische Modell wurde die höchste Übereinstimmung beobachtet. Das probabilistische Modell bietet darüber hinaus den zusätzlichen Vorteil, dass die vorhandenen Unsicherheiten innerhalb des Systems quantifiziert werden.

---

## 8 Schlussbetrachtung

---

### 8.1 Zusammenfassung

Ein zielgerichteter Einsatz der verfügbaren Finanzmittel innerhalb der Straßenerhaltung stellt eines der Hauptaufgaben im Rahmen eines systematischen Erhaltungsmanagements dar. Eine wesentliche Grundlage innerhalb dieses Prozesses stellt die Zustandserfassung und -bewertung dar. Hierbei wird der Zustand von Straßenoberflächen weltweit in regelmäßigen Zeitabständen zum Großteil messtechnisch erfasst und bewertet. Die daraus abgeleiteten Informationen zu aktuellem und zukünftigem Zustand eines Straßennetzes sind wichtige Eingangsgrößen für die Entscheidungsfindung im Rahmen des systematischen Erhaltungsmanagements (vgl. Kapitel 2).

Die Prognose der Zustandsentwicklung von Fahrbahnoberflächen kann sowohl mit Hilfe von deterministischen als auch mit probabilistischen Auswertemethoden erfolgen. Letztere Methoden erweisen sich als komplexer, ermöglichen jedoch die Abbildung von Unsicherheiten, die sowohl bei der Zustandserfassung als auch der -entwicklung vorzufinden sind. Damit bieten sie die Grundlage für eine risikobasierte Entscheidungsfindung innerhalb des Erhaltungsmanagements von Straßen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung und Validierung eines probabilistischen Prognosemodells, welches sowohl die Unsicherheiten bei der Zustandserfassung als auch bei der Abschätzung der Zustandsentwicklung berücksichtigt. Am Beispiel der Ebenheit im Querprofil (mittlere Spurrinnentiefe) sollte die Anwendbarkeit des entwickelten Modells anhand einer Gegenüberstellung der berechneten Prognoseergebnisse und der Ergebnisse der bisher verwendeten deterministischen Verfahren beurteilt werden.

#### Stand des Wissens und Problemstellung

Eine internationale Literaturrecherche zu den bisherigen Erkenntnissen zu probabilistischen Prognoseverfahren zeigte, dass bereits unterschiedliche zufallsbasierte Modelle zur Prognose der Zustandsentwicklung von Straßenoberflächen angewendet wurden (vgl. Kapitel 3). Zu den bekanntesten probabilistischen Methoden zählt der Markov-Prozess, die Survival-Analyse und Ansätze der Bayes'schen Statistik. Diese Methoden lassen sich hinsichtlich des Aufwands bei der Datenaufbereitung, den Möglichkeiten zur Modellierung von Zuständen und Zustandsverläufen, der Berücksichtigung von Messunsicherheiten sowie ihrer Komplexität unterscheiden.

Der Markov-Prozess zählt zwar aufgrund des geringen Aufwands bei der Datenaufbereitung und seiner begrenzten Komplexität zu den am weitesten verbreiteten Ansätzen, beinhaltet jedoch eine Reihe von Nachteilen, die eine Eignung zur Zustandsprognose einschränken.

Für eine Anwendung der Survival-Analyse wird zunächst nur zwischen einem „Überleben“ oder einem „Ausfall“ einer Fahrbahnoberfläche differenziert. Hierzu muss zunächst ein Grenzwert für das Erreichen eines „Ausfalls“ definiert werden. Zudem wird vorausgesetzt, dass der Verlauf der Zustandsentwicklung sowie die Verteilungsfunktion bekannt und über den Prognosezeitraum konstant sind.

Die Ermittlung von abschnittsbezogenen Zustandsentwicklungen stellt jedoch aufgrund einer geringen Anzahl an Messergebnissen je Auswerteabschnitt, der Abhängigkeit von einer Vielzahl an Einflussfaktoren und deren Überlagerung sowie Messunsicherheiten bei der Zustandserfassung eine besondere Herausforderung dar.

---

Die Bayes'sche Statistik bietet den Vorteil, dass sie bei der Zustandserfassung vorhandene Messunsicherheiten explizit innerhalb eines Modells abbilden kann, wohingegen die beim Markov-Prozess häufig angewendete Vorgehensweise zur Ermittlung von Übergangswahrscheinlichkeiten eine Berücksichtigung von gemessenen Zustandsverbesserungen kategorisch ausschließt. Dies führt aus statistischer Sicht zu einer einseitigen Beschneidung der Datengrundlage und damit zu einer verzerrten Darstellung der tatsächlichen Zustandsänderungen (Kapitel 5). Das ist damit begründet, dass die den Messverfahren inne liegende Streuung der Messergebnisse die tatsächlichen Zustandsänderungen überdeckt. Eine einseitige Beschneidung der gemessenen Zustandsänderungen führt bei der bisherigen Vorgehensweise dazu, dass etwa 50 % aller Datensätze für eine Modellentwicklung ausgeschlossen werden. Die beschriebene Problematik ist in der Literatur zum Teil bekannt, jedoch liegen bisher keine geeigneten Lösungsansätze vor. Aufbauend auf bisherigen empirischen Forschungsergebnissen wurde daher im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik erarbeitet, die diese aufgezeigten Defizite überwindet.

### **Datengrundlage**

Für die Entwicklung und Validierung eines probabilistischen Modells wurden als Datengrundlage die Daten der ZEB-Dauermessstrecke in Hessen verwendet (vgl. Kapitel 4). In Ergänzung zu der alle vier Jahre durchgeführten ZEB erfolgt auf dem ca. 76 km langen Teilabschnitt der BAB A5 eine halbjährliche Erfassung und Bewertung des Zustandes auf allen Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn. Neben den Zustandsdaten werden außerdem seit mehreren Jahren Daten zur Verkehrsbelastung, Aufbau und Klima erhoben sowie sämtliche Maßnahmen der betrieblichen und baulichen Erhaltung detailliert dokumentiert. Die ausgeprägte Granularität dieser Daten stellte die Grundlage für die hier durchgeführten Untersuchungen dar.

Im Rahmen von Voruntersuchungen der Zustandsgröße „mittlere Spurrinnentiefe“ war festzustellen, dass ein bedeutender Anteil der gemessenen Zustandsänderungen auf die den Prüfverfahren inne liegende Messunsicherheit und nicht, wie zunächst vermutet, auf eine ungenaue Feinsynchronisierung der Streckenbänder in Längsrichtung zurückzuführen ist. Innerhalb des relativ kurzen Betrachtungszeitraumes von vier Jahren und aufgrund der Messpräzision des Prüfverfahrens war eine Differenzierung zwischen tatsächlich vorhandenen und gemessenen Zustandsänderungen nicht möglich.

### **Modellansatz**

Da die Voruntersuchungen aufzeigten, dass Messabweichungen zu erheblichen Abweichungen zwischen gemessenen und tatsächlichen Zuständen bzw. Zustandsänderungen führen, wurde ein Modell entwickelt, das diese Problematik explizit adressiert. Der entwickelte bayes'sche Modellansatz differenziert zwischen dem wahren Zustand einer Fahrbahnoberfläche, dem gemessenen Zustand in Form von Beobachtungen im Rahmen der ZEB sowie einem mit Hilfe eines Kalman-Filters geschätzten Zustands des Systemverhaltens zu jeweils diskreten Zeitpunkten. Durch die Kombination aus einem a priori festgelegten Systemverhalten und dem kontinuierlichen Abgleich zwischen erwarteten und gemessenen Zuständen kann auf den wahren Zustandsverlauf eines Auswerteabschnittes zurückgeschlossen werden. Das Kalman-Filter wurde zunächst im Rahmen einer Simulation anhand von fiktiven Auswerteabschnitten erprobt und parametrisiert sowie anschließend auf die Zustandsdaten der DMS angewendet.

Auffallend war, dass bei Auswerteabschnitten bereits innerhalb des ersten Nutzungsjahres eine mittlere Spurrinnentiefe von ca. 1,7 mm zu beobachten war. Der Zustand einer in Querrichtung ideal ebenen

---

Straßenoberfläche war hingegen – vermutlich aus bautechnischen Randbedingungen sowie messsystembedingten Einflüssen bei der Zustandserfassung – nicht festzustellen.

Da die Zustandsentwicklung einer Fahrbahnoberfläche einer Vielzahl an Einflussgrößen unterliegt, sind hierbei erhebliche Streuungen zu beobachten, die eine Zustandsprognose erschweren. Daher galt es zunächst, maßgebende Einflussfaktoren zu identifizieren und die daraus entwickelten Hypothesen einer statistischen Prüfung zu unterziehen. Dies erfolgte mit Hilfe eines Wachstumskurvenmodells, welches um den Prädiktor Verkehrsbelastung erweitert wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass die mittlere Spurrinnentiefe auf den Überholfahrstreifen in Asphaltbauweise zu Beginn zunimmt und anschließend auf einem konstanten Niveau stagniert. Auf dem Hauptfahrstreifen ist hingegen ein annähernd linearer, zum Teil progressiver Schadensverlauf zu beobachten. Die qualitativ unterschiedlichen Zustandsverläufe zwischen Haupt- und Überholfahrstreifen zeigen, dass für einen Teil des Netzes die derzeit verwendeten Funktionsverläufe für eine Zustandsprognose nicht zutreffend sind und überprüft werden sollten.

Die Ergebnisse der Wachstumskurvenmodellierung betätigten, dass die Schwerverkehrsbelastung einen Einfluss auf die Entwicklung der Spurrinnentiefen hat und somit eine Differenzierung nach vorhandener Schwerverkehrsbelastung bei der Zustandsprognose der mittleren Spurrinnentiefe zu empfehlen ist. Insgesamt konnten durch die Schwerverkehrsbelastung jedoch nur 10,7 % der Varianz in der Zustandsentwicklung der mittleren Spurrinnentiefe zwischen den Auswerteabschnitten erklärt werden. Dies verdeutlicht, dass eine Vielzahl an weiteren relevanten Einflussfaktoren zu untersuchen ist. Aufgrund der geringen Größe des Datenumfangs sowie nicht vorhandener Daten konnte dies im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen.

### **Entwicklung von Modellvarianten**

Schließlich erfolgten die Entwicklung und Validierung eines probabilistischen Prognosemodells. Dazu wurden drei Modellvarianten entwickelt, validiert und vergleichend gegenübergestellt. Modellvariante 1 basierte auf dem weitverbreiteten Ansatz eines homogenen Markov-Prozesses, wozu die nicht aufbereiteten Messergebnisse von zwei Messzeitpunkten je Auswerteabschnitt verwendet und Zustandsverbesserungen (55 % des Datensatzes) in Anlehnung an die häufig angewendete Vorgehensweise [vgl. Hess et al. 2013; Donev 2014; Iwojlow 2014] systematisch ausgeschlossen wurden. Die Parametrisierung dieser Modellvariante ergab einen linearen Zusammenhang zwischen aktueller Zustandsklasse und der erwarteten Zustandsänderung sowie der zugehörigen Streuung in den kommenden vier Jahren. Die Entwicklung von Modellvariante 2 hingegen erfolgte auf Basis der zuvor mit Hilfe eines Kalman-Filters aufbereiteten Zustandsdaten. Im Vergleich zu Modellvariante 1 konnte der Anteil an Zustandsverbesserungen von ursprünglich 55 % auf ca. 5 % reduziert werden. Der bei Modellvariante 1 zu beobachtende lineare Zusammenhang zwischen Zustandsklasse und Standardabweichung der Zustandsänderung innerhalb von vier Jahren konnte bestätigt werden. Für die mittlere Zustandsänderung in Abhängigkeit der aktuellen Zustandsklasse wurde ein parabelförmiger Ansatz gewählt. Dies bedeutet, dass Fahrbahnoberflächen mit einer bereits ausgeprägten Spurrinnentiefe in den folgenden vier Jahren eine deutlich höhere Schadenszunahme aufweisen als Fahrbahnoberflächen mit einer geringen mittleren Spurrinnentiefe. Die dritte Modellvariante beinhaltete neben der Aufbereitung der Zustandsdaten mit dem Kalman-Filter eine Differenzierung der Zustandsentwicklung in Abhängigkeit des Fahrstreifens je Auswerteabschnitt, um dem Einfluss der Schwerverkehrsbelastung Rechnung zu tragen. Für den Hauptfahrstreifen in Asphaltbauweise zeigte

---

sich innerhalb von vier Jahren eine doppelt so große Schadenszunahme ( $M = 1,0 \text{ mm}$ ,  $SD = 2,3 \text{ mm}$ ) im Vergleich zu den Überholfahrstreifen ( $M = 0,5 \text{ mm}$  bzw.  $0,2 \text{ mm}$ ,  $SD = 0,5 \text{ mm}$  bzw.  $0,2 \text{ mm}$ ).

### **Validierung der Modellvarianten**

Nach der Entwicklung der drei Modellvarianten, wurden diese in einem nächsten Schritt auf deren Validität überprüft. Für die Validierung der entwickelten Modellvarianten wurde eine statistisch unabhängige Teilmenge der Daten verwendet, die mit Hilfe eines zufallsbasierten Auswahlverfahrens separiert wurde. Die Validierung der entwickelten Modellvarianten erfolgte anhand einer Gegenüberstellung der prognostizierten Zustandsverteilungen mit den aus dem Validierungsdatensatz berechneten Zustandsverteilungen nach einer Liegezeit von 20 Jahren.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass durch eine Aufbereitung der Zustandsdaten mit Hilfe eines Kalman-Filters eine verbesserte Abschätzung der Zustandsverteilung nach einer Liegezeit von 20 Jahren erfolgen konnte. Im Vergleich zu den nicht aufbereiteten Zustandsdaten konnte mit Modellvariante 2 die Abweichung zwischen „wahren“ ( $M = 5,0 \text{ mm}$ ) und prognostizierten ( $M = 5,1 \text{ mm}$ ) Mittelwert von  $1,0 \text{ mm}$  auf  $0,1 \text{ mm}$  verringert werden. Die zugehörige Standardabweichung lieferte bei beiden Modellvarianten vergleichbare Ergebnisse mit einer Abweichung zu den „wahren“ Werten von  $1,2 \text{ mm}$  bzw.  $1,5 \text{ mm}$ . Neben einer verbesserten Prognose ermöglichte die Aufbereitung der Daten eine deutliche Vergrößerung der für die Erstellung der Übergangsmatrizen verwendeten Datengrundlage. Zum einen wird anhand der entwickelten Methode der Anteil an statistischen Fehlentscheidungen deutlich reduziert, da nicht pauschal sämtliche Zustandsverbesserungen ausgeschlossen werden, sondern im Rahmen der Messpräzision berücksichtigt werden. Zum anderen können durch die vergrößerte Datengrundlage die Übergangsverteilungen der Zustandsänderungen innerhalb der Matrix wesentlich besser geschätzt werden.

Anhand einer weiteren Differenzierung der Zustandsänderungen nach der Verkehrsbelastung konnten die Zustandsverteilungen sowie die über alle Auswerteabschnitte zusammengesetzte Zustandsverteilung mit hoher Genauigkeit vorhergesagt werden. Die Abweichung des Mittelwertes zwischen „wahrer“ und prognostizierter Zustandsverteilung betrug hierbei  $0,0 \text{ mm}$ . Für die zugehörige Standardabweichung wurde ein Wert von  $2,6 \text{ mm}$  prognostiziert. Die Standardabweichung der „wahren“ Zustandsverteilung betrug hingegen  $3,2 \text{ mm}$ .

### **Vergleich mit deterministischen Prognoseverfahren**

Zum Abschluss der Untersuchungen erfolgte eine Gegenüberstellung der mit dem probabilistischen Modell berechneten Prognoseergebnisse mit den bisher verwendeten deterministischen Prognoseverfahren, welche eine auf homogenen Abschnitten und Zustandswerten basierende Kalibrierung von Verhaltensfunktionen beinhalten. Der Vergleich zeigt auf, dass das entwickelte probabilistische Modell eine vergleichbar gute Übereinstimmung ( $r = 0,941$ ,  $p \leq 0,001$ ) zwischen „wahren“ und prognostizierten Zuständen, wie das in den RPE-Stra 01 enthaltene Verfahren der Koeffizientenanpassung ( $r = 0,924$ ,  $p \leq 0,001$ ) liefert. Das derzeit für Rechenläufe innerhalb des PMS verwendete Curve-Shifting-Verfahren lieferte mit den Daten der ZEB-Dauermesstrecke ebenfalls vergleichbare Ergebnisse mit etwas größten Abweichungen ( $r = 0,918$ ,  $p \leq 0,001$ ). Darüber hinaus ermöglicht die probabilistische Modellierung den zusätzlichen Vorteil, dass die vorhandenen Unsicherheiten innerhalb der Prognose quantifiziert werden.



---

## 8.2 Übertragbarkeit der Methodik auf andere Zustandsmerkmale und Bauweisen

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik wurde am Beispiel der Zustandsgröße mittlere Spurrinnentiefe erarbeitet und exemplarisch auf Straßenabschnitte in Asphaltbauweise angewendet. Die Methodik des Kalman-Filters ist jedoch allgemeingültig und lässt sich auch auf andere Zustandsmerkmale sowie weitere Bauweisen übertragen.

Hierzu sind die jeweilige Präzision des Messverfahrens sowie die empirische mittlere Zustandsentwicklung der Zustandsgröße bei der Modellierung entsprechend anzupassen. Da einige Zustandsmerkmale keine normalverteilten Fehlerverteilungen sowie ausgeprägt nicht-lineare Zustandsverläufe aufweisen, wird für eine Übertragung der Methodik auf entsprechende Erweiterungen des Kalman-Filters verwiesen. Dazu zählen das Extended Kalman-Filter, das Unscented Kalman-Filter und das Partikelfilter, deren Anwendung auf Straßenzustandsdaten noch zu untersuchen ist.

Die Liegezeit je Auswerteabschnitt wurde anhand der zuletzt durchgeführten Erhaltungsmaßnahme an der Deckschicht ermittelt. Dies ist für das Zustandsmerkmal Spurrinnentiefe legitim, da Verformungen im Querprofil hauptsächlich in der Deck- und Binderschicht zu beobachten sind. Für eine Übertragung der Methodik auf die Substanzmerkmale (Oberfläche) ist hingegen je nach Schadensursache das Einbaudatum der Tragschichten zu berücksichtigen.

Das innerhalb des Prognosemodells geschätzte Systemverhalten wurde für die Spurrinnentiefe in Abhängigkeit des Fahrstreifens für Fahrbahnen in Asphaltbauweise modelliert. Im Hinblick auf die Anwendung der Methodik auf weitere Zustandsmerkmale, wie z. B. die Allgemeine Unebenheit, die Griffigkeit und die Risse, sind teilweise andere relevante Einflussfaktoren auf die Zustandsentwicklung zu ermitteln. Dazu kann die Methodik der Wachstumskurvenmodellierung auf andere Zustandsmerkmale übertragen werden. Durch eine gleichzeitige Integrierung von mehreren Zustandsmerkmalen innerhalb eines Modells können zudem zukünftig Abhängigkeiten zwischen diesen Oberflächenmerkmalen über die Zeit statistisch untersucht werden. Ein wesentlicher Vorteil der bayes'schen Methodik besteht jedoch darin, dass das Systemverhalten je Oberflächenmerkmal auch anhand von Laboruntersuchungen abgeschätzt werden kann. Damit wird eine Verknüpfung von Wissen zum mechanistischem Werkstoffverhalten mit empirischen Zustandsdaten innerhalb eines Modells möglich.

Die Messpräzision für die jeweiligen Zustandsgrößen ist aus den Ergebnissen durchgeführter Ringversuche sowie Vergleichsfahrten zu entnehmen. Hierzu liegen für die meisten Zustandsmerkmale stetig aktualisierte Informationen vor. Für die Substanzmerkmale (Oberfläche) liegen zwar aufgrund der teilautomatisierten Auswertung bisher keine Erkenntnisse zur Präzision vor, jedoch sind hierzu zeitnah neue Forschungsergebnisse zu erwarten.

## 8.3 Übertragbarkeit der Methodik auf andere Straßennetze

Die Entwicklung und Anwendung der vorgestellten Methodik erfolgte auf der Basis von Straßenzustandsdaten der DMS BAB A5 in Hessen. Für diesen Streckenabschnitt liegt mittlerweile eine beachtliche Anzahl an Erfassungskampagnen vor. Ebenfalls werden seit 2011 die in diesem Streckenabschnitt durchgeführten Maßnahmen der betrieblichen und baulichen Erhaltung sehr detailliert dokumentiert, sodass das Alter der Auswerteabschnitte vergleichsweise verlässlich abgeschätzt werden konnte. Dies ist im Gesamtnetz leider nicht der Fall.

Die Anwendung latenter Wachstumskurvenmodelle auf Straßenzustandsdaten erfordert zwingend das Wissen über das Alter der Deckschicht und/oder weiterer Schichten, da anderenfalls die einzelnen

---

Auswerteabschnitte zeitlich nicht synchronisiert werden können, sodass eine Modellierung nicht möglich ist. Da jedoch diese Information innerhalb der PMS-Rechenläufe vorliegt, ist eine Anwendung der Methodik grundsätzlich möglich.

Auch die vorgestellte Methodik zur Datenaufbereitung mit einem Kalman-Filter ist grundsätzlich für eine netzweite Anwendung geeignet. Aufgrund der häufigen Zustandserfassungen auf der DMS war es möglich, den wahren Zustandsverlauf eines Auswerteabschnittes im Rahmen der Modellentwicklung treffend abzuschätzen. Für eine Übertragung der Methode auf andere Straßennetze wird empfohlen, die Prozessgleichung merkmalspezifisch und in Abhängigkeit der vorliegenden Randbedingungen je Auswerteabschnitt zu kalibrieren und z. B. in einen nicht-linearen Extended Kalman-Filter zu implementieren. Anschließend kann auch mit weniger Messergebnissen je Auswerteabschnitt eine probabilistische Zustandsprognose erfolgen.

Als Eingangsgrößen in die Modellentwicklung wurden neben den Straßenzustandsdaten auch Informationen zur Verkehrsbelastung genutzt. Diese beiden Datengruppen liegen netzweit in einer guten Datenqualität vor. Die Schwerverkehrsbelastung ist in Abhängigkeit der Fahrstreifenanzahl je Fahrtrichtung auf die einzelnen Fahrstreifen in Anlehnung an die in dieser Arbeit verwendete Methodik aufzuteilen.

#### **8.4 Implementierung in ein Pavement Management System**

Für eine zukünftige Einbindung des entwickelten Modells sind sowohl Anpassungen bei den betroffenen Datenströmen innerhalb der Datenverwaltung und -aufbereitung als auch innerhalb des Rechenkerns vorzunehmen.

Hinsichtlich der Datenverwaltung und -pflege sollten die ERG-Tabellen aus den vorherigen Zustandserfassungen je Auswerteabschnitt miteinander verknüpft und für die Analysen zueinander korrekt zugeordnet werden. Nach Maerschalk et al. [2020] gestaltet sich die praktische Umsetzung bisher zwar noch als problematisch. Dies könnte jedoch zukünftig im Rahmen der neuen Bundesfernstraßenverwaltung wesentlich erleichtert werden. Dadurch kann im Rahmen der Aufbereitung des PMS-Inputs innerhalb des PMS I/O die Qualität der Zustandsanalysen verbessert werden. Eine verbesserte Abschätzung des bisherigen wahren Zustandsverlaufs eines Auswerteabschnittes führt sowohl bei deterministischen Verhaltensfunktionen als auch bei probabilistischen Auswertemethoden zu einer höheren Güte der Prognoseergebnisse. Das Kalman-Filter dient in erster Linie der Verbesserung der Datenqualität im Rahmen der Datenaufbereitung und ist daher unabhängig des gewählten Prognoseverfahrens anwendbar. Hieraus entsteht für eine Anwendung der Methodik kein zusätzlicher Aufwand, wobei mit steigender Anzahl an Messergebnissen die Genauigkeit der Abschätzung des wahren Zustandsverlaufs steigt.

Innerhalb des PMS-Rechenkerns sollte die Abfolge der Module 1 und 2 getauscht werden. Im Gegensatz zu dem bisher angewendeten Verfahren sollte die Zustandsprognose auswerteabschnittspezifisch und nicht auf Basis von vorher gebildeten homogenen Abschnitten erfolgen. Eine Berücksichtigung der Ergebnisse aus den vorherigen Messkampagnen führt dazu, dass der bisherige Zustandsverlauf bei der Prognose berücksichtigt wird und die Abschätzung der Zustandsentwicklung nicht allein auf Basis der aktuellen ZEB-Messkampagne erfolgt. Ähnlich wie bei den deterministischen Prognosemodellen ist das Wissen über das Alter der Deckschicht von besonderer Bedeutung, da dadurch eine verbesserte Modellierung des prognostizierten Zustandes innerhalb des Kalman-Filters erfolgen kann. Liegt dieses Wissen nicht vor, erschwert dies eine Zustandsprognose und führt zu entsprechend größeren Streuungen.

---

Die Zusammenfassung der Auswerteabschnitte zu homogenen Einheiten erfolgt dann erst nach der auswerteabschnittsbezogenen Zustandsprognose. Da die Auswerteabschnitte unterschiedliche Zustandsverläufe aufweisen können, muss die homogene Abschnittsbildung für jedes Jahr separat überprüft und ggf. angepasst werden. Dazu muss jahresweise eine Verknüpfung und Gewichtung der einzelnen Zustandsmerkmale auf Basis der errechneten Zustandsverteilungen je Zustandsmerkmale zu einer Gesamtwertverteilung erfolgen. Die programmtechnische Umsetzung führt zu einer deutlich komplexeren und rechenintensiveren Modellierung. Die vorgeschlagenen Änderungen zur Implementierung des Modellansatzes innerhalb des PMS sind in gelb in Abbildung 132 (siehe folgende Seite) dargestellt.

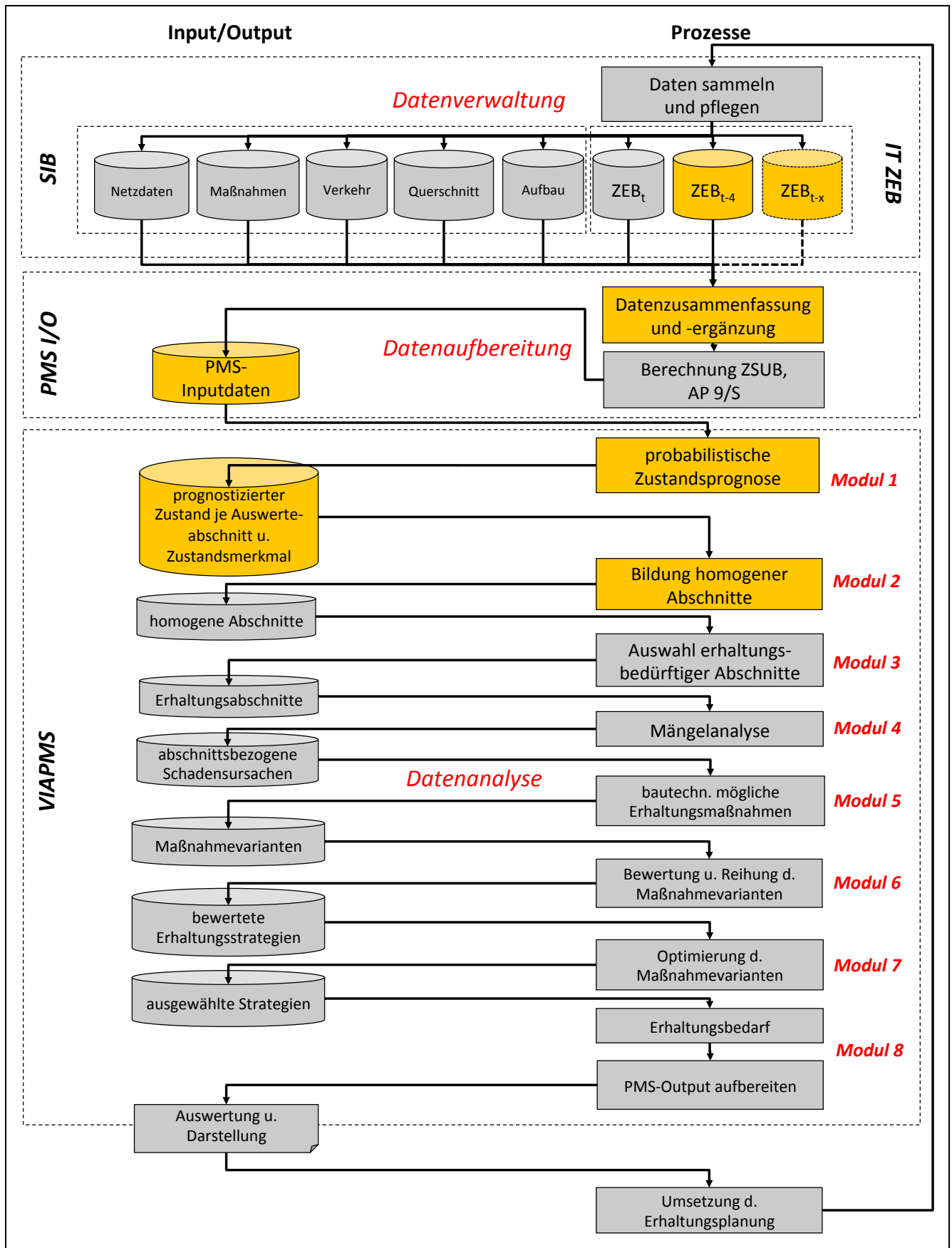


Abbildung 132: Konzept zur Implementierung des Modellansatzes innerhalb des Pavement Management Systems

---

## 8.5 Nutzen des probabilistischen Ansatzes

Die hier vorgestellte Methodik verfügt über den großen Vorteil, Streuungen in der Zustandsprognose quantifizieren zu können. Zahlreiche empirische Untersuchungen an Fahrbahnoberflächen [u. a. Rübensam, Schulze 1994; Klinghammer et al. 1997; RPE-Stra 01; Chou, Pulugurta, Datta 2008; Jia, Huang, Dong, Zhu, Maxwell 2016] zeigen die ausgeprägte Varianz in der Zustandsentwicklung auf. Insbesondere die Unsicherheiten bei der Zustandserfassung sowie in der Zustandsentwicklung können mit deterministischen Modellen nicht abgebildet werden. Sie suggerieren dem Entscheider nicht vorhandene Planungssicherheit. Mit einem probabilistischen Modell hingegen finden die vorhandenen Unsicherheiten bei der Abschätzung der Restnutzungsdauer sowie bei der Planung von Erhaltungsmaßnahmen Berücksichtigung.

Die deterministischen Prognoseverfahren zeichnen sich durch eine einfache Anwendbarkeit und einen geringen Aufwand bei der Modellierung aus. Es besteht zudem ein großer Erfahrungshintergrund zu diesen Modellen. Für die Zustandsprognose der mittleren Spurrinnentiefe wird bisher als charakteristische Verhaltensfunktion ein degressiver Zustandsverlauf modelliert. Die durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss der Schwerverkehrsbelastung auf die Zustandsentwicklung mit Hilfe von Wachstumskurvenmodellen haben jedoch gezeigt, dass insbesondere auf den Auswertabschnitten des Hauptfahrstreifens ein zum Teil progressiver Zustandsverlauf zu beobachten ist. Dieser bereits in anderen Untersuchungen beobachtete Zusammenhang sollte anhand von weiteren Teilnetzen mit variierender Verkehrsbelastung überprüft werden.

Innerhalb der deterministischen Prognoseverfahren können keine Messunsicherheiten modelliert werden, sodass dieser Einflussfaktor keine Berücksichtigung findet. Des Weiteren ist eine alleinige Berücksichtigung des Messergebnisses der letzten Zustandserfassung kritisch zu bewerten. Zum einen führt dies zu einer Überbewertung des Messergebnisses der letzten Zustandserfassung. Zum anderen wird dadurch die bisherige Zustandsentwicklung eines Auswerteabschnitts nicht berücksichtigt, woraus sich wichtige Informationen zur weiteren Zustandsentwicklung ableiten ließen. Zuletzt ist die Zustandsprognose anhand eines einzelnen Messergebnisses generell als stark unsicherheitsbehaftet zu bewerten, das mit Hilfe eines deterministischen Verfahrens nicht abgebildet werden kann.

Auch wenn die hier vorgestellte Methodik im Vergleich zu den bisher eingesetzten deterministischen Verfahren einen größeren Aufwand bei der Datenaufbereitung, eine größere Komplexität bei der Modellierung sowie einen erhöhten Rechenaufwand innerhalb des PMS aufweist, so ermöglicht der probabilistische Ansatz die Abbildung von Streuungen in der Zustandsprognose. Durch eine Berücksichtigung von Messunsicherheiten innerhalb des Modells kann zudem die Datenqualität einzelner Erfassungskampagnen explizit abgebildet und verbessert werden. Die Berücksichtigung der Messergebnisse aller bisherigen Zustandserfassungen führt zu einer Abbildung der vorhandenen Streuungen in der abschnittsbezogenen Zustandsprognose. Eine verbesserte Prognose ermöglicht zugleich die Möglichkeit der Simulation und Prüfung von Erhaltungsstrategien. Mit Hilfe von Simulationen ist es möglich, Erhaltungsstrategien wesentlich zu verfeinern und damit dem Planer eine verbesserte Entscheidungsgrundlage zur Verfügung zu stellen [Klinghammer et al. 1997]. Der Vergleich verschiedener Erhaltungsstrategien auf der Basis von Wahrscheinlichkeitsverteilungen ermöglicht die Grundlage für eine risikobasierte Entscheidungsfindung. Der Vorteil eines risikobasierten Vergleichs offenbart sich insbesondere dann, wenn Ereignisse mit unterschiedlichen Verteilungstypen miteinander verglichen werden. Aus dem Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit und der zugehörigen Schadenshöhe kann das Risiko eines Ereignisses quantifiziert werden. Das Modell liefert damit die Grundlage für die Abbildung

---

von Szenarien und deren Risikobewertung, die im Rahmen eines anlagenübergreifenden Erhaltungsmanagements gefordert und in den USA Anwendung finden [Uddin, Hudson, Haas 2013].

## 8.6 Ausblick und Empfehlungen

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, die zeitliche Entwicklung der Zustandsgröße mittlere Spurrinnentiefe sowie die damit verbundenen Unsicherheiten anhand einer probabilistischen Prognose treffend abzuschätzen. Dies stellt zugleich den wesentlichen Vorteil im Vergleich zu den bisher verwendeten deterministischen Verfahren dar. Obwohl diese Arbeit bereits umfangreiche Untersuchungen beinhaltet, bestehen weiterhin Forschungsdesiderate, von denen einige im Folgenden kurz erläutert werden.

Das hier entwickelte Prognosemodell berücksichtigt bereits den Einfluss der Verkehrsbelastung mit Hilfe einer Differenzierung nach Fahrstreifen. Zukünftig sind die Ursache–Wirkungs-Zusammenhänge zwischen weiteren Einflussgrößen und auf die Zustandsentwicklung vertiefend zu analysieren. Eine hierfür erfolgsversprechende Methodik der Wachstumskurvenmodellierung liegt bereits vor. Mit diesem strukturprüfenden Verfahren sollten zunächst weitere wichtige Einflussfaktoren (z. B. Schicht- und Baustoffeigenschaften, Klima etc.) untersucht werden, sobald hierfür netzweit eine Datengrundlage in ausreichender Qualität vorliegt. Im Anschluss daran kann das Modell entsprechend erweitert werden.

Eine zusätzliche Berücksichtigung von Schicht- und Baustoffeigenschaften des Oberbaus innerhalb des Modells verspricht eine Verfeinerung der abschnittsbezogenen Prognose. Dies kann für einzelne Streckenabschnitte gemäß den Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise (RSO Asphalt) [2015] erfolgen. Aufgrund der hierzu erforderlichen Bohrkernentnahmen ist das Verfahren jedoch nicht für eine netzweite Anwendung innerhalb des PMS vorgesehen. Stattdessen könnten die mit dem schnell fahrenden Messsystem Traffic-Speed-Deflectometer (TSD) gewonnenen Informationen zur strukturellen Substanz des Oberbaus in die Modellierung des Systemverhaltens einer Straßenbefestigung integriert werden.

Zusammenfassend lassen sich die folgenden Empfehlungen aussprechen, die zukünftig anhand von weiteren Untersuchungen analysiert werden sollten:

- Übertragung der Methode auf andere Zustandsmerkmale und andere Bauweisen
- Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Zustandsmerkmalen über den zeitlichen Verlauf
- Erweiterung des Modells um zusätzliche Einflussfaktoren und Daten zur strukturellen Substanz
- Anwendung der Methode auf größere Straßennetze
- Erprobung der Methodik im Rahmen des PMS

Das entwickelte Modell ermöglicht die Abbildung von probabilistischen Prognoseszenarien und bietet damit die Möglichkeit einer abschnittsbezogenen, risikobasierten Entscheidungsfindung innerhalb des Erhaltungsmanagements. Unabhängig von der statistischen Auswertemethode gilt, dass eine präzisere Zustandsprognose erfolgen kann je mehr Informationen (z. B. Alter, Verkehrsbelastung, Bauweise, Materialeigenschaften) in der Datengrundlage enthalten sind. Die Qualität einzelner Datenquellen sowie die Möglichkeit der Verschneidung sämtlicher relevanter Daten beeinflussen die Güte von Auswertungen erheblich. Ein bedeutendes Optimierungspotential besteht hierbei weiterhin in einer netzweiten, systematischen Dokumentation und Verwaltung von Informationen zu durchgeführten

---

Erhaltungsmaßnahmen sowie der Datenpflege von Informationen zum Schichtenaufbau. Für diese Tätigkeiten sind zukünftig die entsprechenden finanziellen und personellen Ressourcen zur Verfügung zu stellen.

---

## Literaturverzeichnis

---

**Abaza, K. A.:**

Empirical Approach for Estimating the Pavement Transition Probabilities used in Non-Homogenous Markov Chains. International Journal of Pavement Engineering, 18 (2), pp. 128–137, Informa UK Limited, London, U.K., 2017

**Abbeel, P.; Coates, A.; Montemerlo, M.; Ng, A. Y.; Thrun, S.:**

Discriminative Training of Kalman Filters. Robotics: Science and Systems, Cambridge, U.S.A., 2005

**Abele, M.:**

Modellierung und Bewertung hochzuverlässiger Energiebordnetz-Architekturen für sicherheitsrelevante Verbraucher in Kraftfahrzeugen. Dissertation am Fachbereich Elektrotechnik/Informatik der Universität Kassel, Kassel, 2008

**Aguiar-Moya, J.; Banerjee, A.; Prozzi, J. A.:**

Survival Analysis of Rutting for Flexible Pavements Based on LTPP Sections. Proceedings of the 11th International Conference on Asphalt Pavements, Volume I, pp. 943-952, International Society for Asphalt Pavements, Japan Road Association, Nagoya, Japan, 2010

**Aguy, T.; Baillemont, G.; Costa, A.; Guaray, A. G.; Van Geem, C.; Ghilain, E.; Giannattasio, P.; Guisse, S.; Kokot, D.; Lepert, Ph.; Mc Craig, E.; Nicolosi, P.; Padure, F.; Poelmans, W.; Tarbouriech-Cousin, D.; Tofful, A.:**

High Level Management Indicators. Technical Committee D.1, Management of Road Infrastructure Assets, World Road Association (PIARC), La Défense cedex, Frankreich, 2012

**Albers, S.; Klapper, D.; Konradt, U.; Walter, A.; Wolf, J.:**

Methoden der empirischen Bildungsforschung. 3. Auflage, Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, 2009

**Anderson, J. C.; Gerbing, D. W.:**

Structural Equation Modeling in Practice: A Review and Recommended two-step Approach. Psychological Bulletin (103), pp. 411-423, 1988

**Anderson, R. D., Vastag, G.:**

Causal Modeling Alternatives in Operations Research: Overview and Application. European Journal of Operational Research 156 (1), pp. 92-109, 2004

**AP 9/A1:**

Arbeitspapier 9/A1 zur Zustandserfassung und -bewertung der Fahrbahnoberflächen von Straßen, Reihe A: Auswertung. Ausgabe 2001, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, 2001

**AP 9/C2:**

Arbeitspapier zur Systematik der Straßenerhaltung, Abschnitt C2: Messtechnische Zustandserfassung (Entwurf). Arbeitsgruppe Sonderaufgaben (Hrsg.), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, 1985



---

**AP 9/D:**

Arbeitspapier zur Systematik der Straßenerhaltung, Abschnitt D: Zustandsbewertung (2. Entwurf). Arbeitsgruppe Sonderaufgaben (Hrsg.), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **1990**

**AP 9/M2:**

Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung, Reihe M, Abschnitt M2: Zustandserfassung von Straßennetzen (Außerortsstraßen). Ausgabe 2001 (ersetzt durch Neufassung von 2019: AP 9/M), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2001**

**AP 9/R1:**

Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung, Reihe R: Rechnergestützte Erhaltungsplanung für Fahrbahnbefestigungen, Abschnitt R1: Standardkennwerte der Programmkenngößen. Ausgabe 2001, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr. 490 AP9R, FGSV-Verlag, Köln, **2001**

**AP 9/R2:**

Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung, Reihe R: Rechnergestützte Erhaltungsplanung für Fahrbahnbefestigungen, Abschnitt R2: Anforderungen an die Eingangsdaten. Ausgabe 2001, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr. 490 AP9R, FGSV-Verlag, Köln, **2001**

**AP 9/S:**

Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung, Reihe S: Substanzwert (Bestand). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr. 433, FGSV-Verlag, Köln, **2019**

**Arenknecht, R.:**

Implementierung und Evaluation verschiedener Bayes-Filter für das Personentracking. Fakultät für Informatik und Automatisierung der Technischen Universität Ilmenau, Ilmenau, **2015**

**Ariaratnam, S.; El-Assaly, A.; Yang, Y.:**

Assessment of Infrastructure Inspection Needs Using Logistic Models. Journal of Infrastructure Systems, Vol. 7(4), pp. 160-165, **1991**

**Arzheimer, K.:**

Strukturgleichungsmodelle – Eine anwendungsorientierte Einführung. Behnke, Klein, Schoen (Hrsg.) Springer VS Verlag, Wiesbaden, **2016**

**Backhaus, H.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.:**

Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung. 14. Auflage, Springer Gabler Verlag, Heidelberg, **2016**

**Baik, H.-S.; Seok, H. J.; Abraham, D. M.:**

Estimating Transition Probabilities in Markov Chain-based Deterioration Models for Management of Wastewater Systems. Journal of Water Resources Planning and Management, American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 132(1), pp. 15-24, Reston, USA, **2006**

**Bald, J. S.:**

Grundlagen für die Anwendung von Risikoanalysen im Straßenwesen. Dissertation am Fachgebiet Straßenwesen der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, **1991**

---

**Bald, J. S.; Lutz, P.; Weidich, P.:**

Aktualisierung der Ermittlung von Vergleichs- und Wiederholstreubereichen von Griffigkeitsmesssystemen (SCRIM). in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 900, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.), Bonn, **2004**

**Bartolomaeus, W.:**

Über die Entwicklung von Fahrbahnnunebenheiten aus Homogenitätsschwankungen bei Asphaltbetonstraßen. Dissertation an der Universität Hannover, **2003**

**Bellman, R.E.:**

Equipment Replacement Policy. Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics, Vol. 3 No. 8, pp. 133-146, **1955**

**Bergmann-Syren, J.; Smet, W.; Komma, Ch.; Skakuj, M.:**

The Long-Term Observation on Motorway BAB A5 in Hesse as a Data Source for Research in the Field of Road Maintenance. World Conference on Pavement and Asset Management (WCPAM), Baveno, **2017**

**Binkley, C.S.:**

Is Succession in Hardwood Forests a Stationary Markov Process?. Forest Science, Vol. 26, pp. 566-570, **1980**

**Black, M., Brint, A. T., and Brailsford, J. R.:**

Comparing Probabilistic Methods for the Asset Management of Distributed Items. Journal of Infrastructure Systems, American Society of Civil Engineers, 11(2), pp. 102-109, Reston, USA, **2005**

**Black, M., Brint, A. T., and Brailsford, J. R.:**

A Semi-Markov Approach for Modelling Asset Deterioration. Journal of the Operational Research Society, Vol. 56, pp. 1241-1249, Birmingham, U.K., **2005**

**Bleßmann, W.; Böhm, S.; Rosauer, V.; Schäfer, V.:**

ZTV BEA-StB – Handbuch und Kommentar. 1. Auflage, Kirschbaum Verlag, Bonn, **2010**

**Blumenfeld, T.:**

Describing Changes in Road Condition by Numerically Described Multi-Dimensional Probability Distributions. Transportation Research Arena (TRA), Warschau, Polen, **2016**

**Blumenfeld, T.:**

Analysis on Measured Condition Improvements with Regard to the Effect of Maintenance Treatments and the Precision of Measuring Methods. XXVIth World Road Congress, Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate, **2019**

**Blumenfeld, T.:**

Die ZEB-Dauermessstrecke – Sachstand und Ausblick. in: Straße und Autobahn, Kirschbaum-Verlag, Bonn, **in Vorbereitung**

---

**Blumenfeld, T.; Bald, J. S.:**

Erstellung eines Konzeptes zur Einführung von Kennzahlen für die strategische Erhaltungsplanung. Vorstudie (unveröffentlicht), Darmstadt, **2017**

**Bollen, K. A.; Curran, P. J.:**

Latent Curve Models – A Structural Equation Perspective. Hoboken: Wiley, **2006**

**Boomsma, A.:**

On the Robustness of LISREL (Maximum Likelihood Estimation) Against Small Sample Size and Non Normality. Haren: Phd thesis, Groningen, Niederlande, **1983**

**Bortot, F.; Zonta, D; Zandonini, R:**

A Bridge Management Strategy based on Future Reliability and Semi-Markov Deterioration Models. 3rd International ASRANet Colloquium 10th – 12th July, Glasgow, U.K., **2006**

**Bortz, J.:**

Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 6., vollständig überarbeitete Auflage, Springer Medizin Verlag, Heidelberg, **2005**

**Bossel, H.:**

Modelling Forest Dynamics. Moving from Discription to Explanation, Forest Ecology and Management. Heft 42, pp. 129-142, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Niederlande, **1991**

**Brandherm, B.:**

Eingebettete dynamische Bayessche Netze n-ter Ordnung. Dissertation an der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät I der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, **2006**

**Brandt, H.:**

Schätzung latenter nichtlinearer Effekte in Quer- und Längsschnittstudien. Dissertation am Fachbereich 05 der Goethe-Universität in Frankfurt am Main, Frankfurt am Main, **2013**

**Braun, H.:**

Untersuchungen über Fahrbahnunebenheiten. in: Deutsche Kraftfahrorschung und Straßenverkehrstechnik, Heft 186, Bundesministerium für Verkehr, Bonn-Bad Godesberg, **1966**

**Braun, H.; Laermann, F.-J.; Liesner, W.:**

Einfluss von Spurrinnen und Spurkanen auf das Fahrverhalten. Bericht-Nr. 618 des Instituts für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, Schlussbericht zum FA 4.097 G 81 D, Braunschweig, **1983**

**Braun, H.; Liesner, W.; Gerz, U.; Ohnemüller, L.; Altendorfer, D.; Sulten, P.; Hellenbroich, T.:**

Sammlung und Auswertung von Straßenunebenheitsdaten – Untersuchung und Vergleich verschiedener Messgeräte und Auswerteverfahren auf Eignung zur routinemäßigen Erfassung und Bewertung des Ebenheitszustandes (Teil 1). in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 598, Bundesminister für Verkehr (Hrsg.), Bonn-Bad Godesberg, **1985**

**Browne, K. A.; Cudeck, J. S.:**

Alternative ways of assessing equation model fit. in: K. A. Bollen & J. S. Long (Hrsg.), Testing structural equation models, pp. 136-162, Newbury Park: Sage, **1993**

---

**Bruner, H.D.; Moser, J. W.:**

A Markov Chain Approach to the Prediction of Diameter Distributions in uneven-aged Forest Stands. Canadian Journal of Forest Research 3, pp. 409-417, Birmingham, U.K., **1973**

**Bryce, J.; Rada, G.:**

Effect of Measurement Variability on Overall Pavement Condition in the Highway Performance Monitoring System. Transportation Research Board – Annual Meeting 2018, Washington, D.C., USA, **2018**

**Buckman, R.E.:**

Growth and Yield of Red Pine in Minnesota. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, University of Minnesota, Minnesota, USA, **1962**

**Bühler, B.; Gast, H.; Klinkhammer, S.; Koch, R.; Maerschalk, G.; Oertelt, S.:**

Erstellung eines Leitfadens für die Erfassung und Bewertung des Zustandes von Straßen. in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 832, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, **2002**

**Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt):**

Zustandsbewertung der ZEB für Bundesfernstraßen ab 2015. IT-ZEB-Server, Stand: 27.02.2018, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, **2018**

**Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI):**

Anweisung Straßeninformationsbank (ASB). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin, **2014**

**Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI):**

Bundesverkehrswegeplan 2030. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin, **2016**

**Buseck, H.; Hürtgen, H.:**

Über den Mechanismus der Entstehung bleibender Verformung an flexiblen Fahrbahnbefestigungen. in: Beiträge aus Wissenschaft und Praxis, Mitteilungen aus dem Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau, Universität Hannover, Heft 5, **1987**

**Butt, A. A.; Shahin, M.; Feighan, K. J.; Carpenter, S. H.:**

Pavement Performance Prediction Model Using the Markov Process. Transportation Research Record, Washington, D.C., USA, **1987**

**Butt, A. A.; Shahin, M.; Carpenter, S. H.; Carnahan, J. V.:**

Application of Markov Process to Pavement Management Systems at Network Level. 3rd International Conference on Managing Pavements, Conference Proceedings, Vol. 3, San Antonio, USA, **1994**

**Carnahan, J. V.; Davis, W. J.; Shahin, M.; Keane, P. L.; Wu, M. L.:**

Optimal Maintenance Decisions for Pavement Management. Journal of Transportation Engineering, 113(5), pp. 554-572, American Society of Civil Engineers, Reston, USA, **1987**

**Cesare, M. A.; Santamaria, C.; Turkstra, C.; Vanmarcke, E. H.:**

Modeling Bridge Deterioration with Markov Chains. Journal of Transportation Engineering, Vol. 118, No.6, pp. 820-833, American Society of Civil Engineers, Reston, USA, **1992**

---

**Chin, W. W.:**

The partial least squares approach for structural equation modeling. in: G. A. Marcoulides (Hrsg.), Modern methods for business research, Lawrence Erlbaum Associates, London, U.K., **1998**

**Chou, E.; Pulugurta, H.; Datta, D.:**

Pavement Forecasting Models. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation and Ohio Department of Transportation, Report No. FHWA/OH-2008/3, Columbus, USA, **2008**

**Christofa, E. M.; Madanat, S. M.:**

Development of Pavement Cracking Initiation Models by Combining Experimental and Field Data. Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, **2010**

**Clutter, J.L.:**

Compatible Growth and Yield Models for Loblolly Pine. Forest Science Vol. 9(3), pp. 354-371, Society of American Foresters, Bethesda, USA, **1963**

**Degelmann, R.:**

Erhaltungsmanagement – Warum es wichtig ist, nicht nur oberflächlich zu denken. in: bau intern Sonderheft August 2011, Erhaltungsmanagement an Straßen in Bayern, zweite, aktualisierte Auflage, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, Edition Lipp Verlagsgesellschaft mbH, München, **2011**

**Degelmann, R.; Heller, S.:**

Kennzahlen zur systematischen Beschreibung und Weiterentwicklung der Straßeninfrastruktur in Bayern. in: Straßenverkehrstechnik, Heft 6, S. 351-361, Kirschbaum Verlag, Bonn, **2016**

**DIN EN ISO 9000:**

Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Ausgabe Dezember 2005, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Beuth Verlag, Berlin, **2005**

**DIN EN 13036-8:**

Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 8: Bestimmung der Parameter zur Ermittlung der Breitenunebenheit. Ausgabe Dezember 2008, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Beuth Verlag, Berlin, **2008**

**Donev, V.:**

Erhaltungsmanagement Straßenoberbau – Zustandsbewertung und Zustandsprognose. Mitteilungen Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen, Technische Universität Wien, Wien, Österreich, **2014**

**Donev, V.; Hoffmann, M.:**

Condition Prediction and Estimation of Service Life in the Presence of Data Censoring and dependent Competing Risks. International Journal of Pavement Engineering, Informa UK Limited, London, U.K., **2017**

---

**Dröge, Ch.:**

Systematische Nutzung von Bestandsdaten. in: Straße und Autobahn, Heft 4, S. 279-286, Kirschbaum-Verlag, **2017**

**Druzdzal, M. J.; Simon, H. A.:**

Causality in Bayesian Belief Networks. In: Proceedings of 9th Annual Conference in Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, pp. 3-11, **1993**

**Eichhorn, A.:**

Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven KALMAN-Filterung. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Verlag C.H. Beck, München, **2005**

**Eisenbach, M.; Stricker, R.; Seichter, D.; Amende, K.; Debes, K.; Sesselmann, M.; Ebersbach, D.; Stöckert, U.; Gross, H.-M.:**

How to Get Pavement Distress Detection Ready for Deep Learning? A Systematic Approach. International Joint Conference on Neural Networks, pp. 2039-2047, Anchorage, USA, **2017**

**Eisenmann, J.; Hilmer, A.:**

Einfluss der Radlasten und Reifeninnendrucke auf die Spurrinnenbildung von Asphaltstraßen – Experimentelle und theoretische Untersuchungen, Vergleich von Einzelbereifung und Zwillingsbereifung bezüglich ihres Einflusses auf die Spurrinnenbildung. in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 667, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Bonn-Bad Godesberg, **1986**

**E EMI**

Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen (E EMI). Ausgabe 2003 (ersetzt durch Neufassung von 2012, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln, **2003**

**E EMI:**

Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen (E EMI). Ausgabe 2012, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr. 487, FGSV-Verlag, Köln, **2012**

**Fan, X.; Fan, X.:**

Power of latent growth modeling for detecting linear growth: Number of measurements and comparison with other analytic approaches. The Journal of Experimental Education (73), S. 121-139, **2005**

**Farrell, F. B.; Winfrey, R.:**

Life Characteristics of Surfaces Constructed on Primary Rural Highways. Public Roads (22), Issue 1, pp. 1-24, **1941**

**Fastrich, A.; Girmscheid, G.:**

Optimierungsmodell – Deterministische, lebenszyklusorientierte, dynamische Optimierung der Straßenunterhaltsmaßnahmen. Bauingenieur (85), Heft 9, S. 385-392, **2010a**

---

**Fastrich, A.; Girmscheid, G.:**

Optimierungsmodelle – Probabilistische Optimierung der Straßenunterhaltsmaßnahmen mittels Markov-Ketten und Monte-Carlo-Simulation. Bauingenieur (85), Heft 11, **2010b**

**Federal Highway Administration (FHWA):**

Reformulated Pavement Remaining Service Life Framework. Publication No. FHWA-HRT-13-038, McLean, Georgetown Pike, USA, **2013**

**Fergen, M.; Hess, R.; Roos, R.:**

A Stochastic Approach to the Lifetime Prediction of Pavement Structures. 4th European Pavement and Asset Management Conference (EPAM), Malmö, Schweden, **2014**

**Ferreira, A.; Pais Antunes, A.; Picado Santos, L.:**

Pavement Performance Modeling. State of the Art. Civil-Comp Ltd., Edinburgh, Scotland, **1999**

**Finney, S. J.; DiStefano, C.:**

Nonnormal and categorical data in structural equation modeling. in: G. R. Hancock & R. O. Mueller, (Eds.), Structural Equation Modeling: A Second Course, 2nd Edition, pp. 439-492, Charlotte, USA, **2013**

**Fitschen, A.; Nordmann, H.:**

Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014. BASt-Bericht V 278, Carl Schünemann Verlag GmbH, Bremen, **2016**

**Flintsch, G. W.; McGhee, K. K.:**

Quality Management of Pavement Condition Data Collection. National Cooperative Highway Research Program Synthesis 401, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, **2009**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Merkblatt für Ebenheitsprüfungen. Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn, Köln, **1976a**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Merkblatt zum Erfassen des Verschleißes und der Verformungen von Fahrbahnbefestigungen. Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn, Köln, **1976b**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 4: Auswertung von Ringversuchen und Errechnung von Prüffehlern. Ausgabe 1982, FGSV-Nr. 926/4, FGSV-Verlag, Köln, **1982**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Grundsätze zur Berücksichtigung technischer und statistischer Gegebenheiten bei der Festlegung von Anforderungen und bei deren Überprüfung auf Erfüllung in Technischen Regelwerken. Ausgabe 1994, FGSV-Nr. 943, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **1994**

---

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Stra). Ausgabe 2001, Best.-Nr. 988, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2001a**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Arbeitspapier 9/A1 zur Zustandserfassung und -bewertung der Fahrbahnoberflächen von Straßen, Reihe A: Auswertung. Ausgabe 2001, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2001b**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung, Reihe M, Abschnitt M2: Zustandserfassung von Straßennetzen (Außerortsstraßen). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2001, FGSV-Verlag, Köln, **2001c**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung, Reihe R: Rechnergestützte Erhaltungsplanung für Fahrbahnbefestigungen, Abschnitt R1: Standardkennwerte der Programmkenngößen. Ausgabe 2001, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2001d**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung, Reihe R: Rechnergestützte Erhaltungsplanung für Fahrbahnbefestigungen, Abschnitt R2: Anforderungen an die Eingangsdaten. Ausgabe 2001, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2001e**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau – Teil: Messverfahren SCRIM (TP Griff-StB). Ausgabe 2001, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2001f**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen (E EMI). Ausgabe 2003, Best.-Nr. 987, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln, **2003**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen (ZTV ZEB-StB). Ausgabe 2006, Best.-Nr. 998, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2006**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung – Teil: Berührende Messungen (TP Eben – Berührende Messungen). Ausgabe 2007, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Best.-Nr. 404, FGSV-Verlag, Köln, **2007**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau – Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM) (TP Griff-StB (SKM)). Ausgabe 2007, Best.-Nr. 408/1/R1, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2007**



---

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Asphaltbauweisen (ZTV BEA-StB). Ausgabe 2009, Fassung 2013, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Best.-Nr. 798, FGSV-Verlag, Köln, **2009**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt) Ausgabe 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Best.-Nr. 498, FGSV-Verlag, Köln, **2009**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen (E EMI). Ausgabe 2012, Best.-Nr. 487, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2012**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO). Ausgabe 2012, Best.-Nr. 499, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln, **2012**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen (ZTV BEB-StB). Ausgabe 2015, Best.-Nr. 898, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2015**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Richtlinien zur Beurteilung der strukturellen Substanz von Asphaltstraßen (RSO Asphalt) Entwurfsfassung 2015, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2015**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen (ZTV ZEB-StB). Ausgabe 2006 mit Korrekturblatt und Änderung von Anhang 8, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr. 998, FGSV-Verlag, Köln, **2018**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung, Reihe S: Substanzwert (Bestand). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2019**

**Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV):**

Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Stra). überarbeitete Fassung des Arbeitskreises 4.1.1: Entscheidungsvorbereitung im Erhaltungsmanagement, FGSV-Verlag, Köln, **in Vorbereitung**

**Franke, H.-J.:**

Griffigkeit von Fahrbahnen aus Beton. in: Straße und Autobahn, S. 218-224, Kirschbaum-Verlag, Bonn, **2004**

**Fu, G.; Devaraj, D.:**

Methodology of Homogeneous and Non-Homogeneous Markov Chains for Modelling Bridge Element Deterioration. Final Report to Michigan Department of Transportation, Center for Advanced Bridge Engineering, Civil and Environmental Engineering Department, Wayne State University, USA, **2008**

---

**Garcia, E.:**

Bayes-Filter zur Genauigkeitsverbesserung und Unsicherheitsermittlung von dynamischen Koordinatenmessungen. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Fertigungstechnik, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, **2014**

**Geiser, Ch.:**

Datenanalyse mit Mplus – Eine anwendungsorientierte Einführung. 1. Auflage, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, **2010**

**Gerlach, A.; Beckedahl, H.; Köhler, M.; Arand, W.; Dörschlag, S.; Lorenzl, H.:**

Prognose der maßgebenden Zustandsmerkmale für Asphaltstraßen im Rahmen des Erhaltungsmanagements. in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 645, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Bonn-Bad Godesberg, **1994**

**Ghahramani, Z.:**

An Introduction to Hidden Markov Models and Bayesian Networks. Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence (15), Issue 1, pp. 9-42, World Scientific, Singapur, **2001**

**Glomb, P.:**

Statistische Modelle und Methoden in der Analyse von Lebenszeitdaten. Diplomarbeit an der Universität Oldenburg, Oldenburg, **2007**

**Goacolou, H.:**

Calculation of the Rutting of Structures – Castor Program Method for Prediction of Permanent Deformations in Asphaltic Structures. Proceedings of the 6th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, Ann Arbor, Michigan, USA, **1987**

**Golabi, K.; Kulkarni, R.B.; Way, G.B.:**

A Statewide Pavement Management System. Interfaces, Vol. 6 No. 12, pp. 5-21, **1982**

**Golabi, K.; Thompson, P. D.; Hyman, W. A.:**

Pontis Version 2.0: Technical Manual, Band 2: A Network Optimization System for Bridge Improvements and Maintenance. Optima, Incorporated, USA, **1993**

**Green, P.; Tull, D.:**

Methoden und Techniken der Marketingforschung. 4. Auflage, Stuttgart, **1982**

**Gronberg, G. D.; Blosser, N. B.:**

Lives of Highway Surfaces – Half Century Trends. Highway Research Board Proceedings (35), pp. 89-101, Washington, D.C., USA, **1956**

**Gupta, S., Kim, H. W.:**

Developing the Commitment to Virtual Community: The Balanced Effects of Cognition and Affect. Information Resource Management Journal 20 (1), pp. 28-45, **2007**

---

**Guigner, F.; Madanat, S.:**

Optimization of Infrastructure Systems Maintenance and Improvement Policies. Journal of Infrastructure Systems, Vol. 5(4), pp. 124–134, American Society of Civil Engineers, Reston, USA, **1999**

**Haas, R.; Hudson, W. R.; Zaniewski, J. P.:**

Modern Pavement Management. Krieger Publishing Company; Auflage: Original Edition (Februar 1994), Florida, USA, **1994**

**Haas, R.; Felio, G.; Lounis, Z.; Falls, Lynne C.:**

Measurable Performance Indicators for Roads: Canadian and International Practice. Paper Prepared for Presentation at the “Best Practices in Urban Transportation Planning: Measuring Change” Session at the Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Vancouver, British Columbia, **2009**

**Hajek, J. J.; Bradbury, A.:**

Pavement Performance Modeling Using Canadian Strategic Highway Research Program Bayesian Statistical Methodology. Transportation Research Record, Vol. 1524, pp. 160-170, Washington, D.C., USA, **1996**

**Hajdin, R.; Peeters, L.:**

Bridging Data Voids – Advanced Statistical Methods for Bridge Management in KUBA. 10th International Bridge and Structure Management Conference, Buffalo, N.Y., USA, **2008**

**Harper, W. V.; Majidzadeh, K.:**

Utilization of Expert Opinion in the Two Pavement Management Systems. 70th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, **1991**

**Heller, S.:**

Zukünftige Entwicklung im Bereich des Erhaltungsmanagements und der Zustandserfassung und -bewertung. in: bau intern Sonderheft August 2011, Erhaltungsmanagement an Straßen in Bayern, zweite, aktualisierte Auflage, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, Edition Lipp Verlagsgesellschaft mbH, München, **2011**

**Heller, S.:**

Erhaltungsmanagement von Straßen – Pavement Management System (PMS). in: BauPortal, Heft 5, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin, **2012**

**Heller, S.; Komma, Ch.; Maerschalk, G.; Nagel, M.; Schniering, A.:**

Zustandserfassung und Bewertung der Fahrbahnoberflächen der Bundesfernstraßen 1999-2005: Dokumentation und bundesstatistische Analyse. FE 29.0147/2005, BMVBW, Bonn, **2006**

**Heller, S.; Socina, M.; Rübensam, J.:**

Umsetzung des Längsebenheitswirkindex (LWI) in ein praxisnahes, Erhaltungsmaßnahmen auslösendes Verfahren im Rahmen der systematischen Straßenerhaltung. Forschungsprogramm Straßenwesen Nr. FE 04.200/2004/DRB, BMVBW, Bonn, **2006**

**Heller, S.; Düsterhöft, F.; Dziubaltowska, M.; Sliwinska, A.; Bohnoff, Ch.; Lesniewski, M.:**

Kennzahlen zur Beschreibung der Qualität der Straßeninfrastruktur. Schlussbericht (unveröffentlicht) zum Auftrag des Landesbetriebes Straßenbau Nordrhein-Westfalen, Darmstadt, **2015**

---

**Hellmann, L.; Rübensam, J.:**

Entwicklung von Verfahrenshilfen zur Berücksichtigung baustellenbedingter Nutzerkosten im Erhaltungsmanagement – Teil 1: Erarbeitung eines Verfahrens zur Minimierung der baustellenbedingten Nutzerkosten für das Erhaltungsmanagement (PMS). in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 988, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr (Hrsg.), Bonn, 2008

**Hess, R.; Fergen, M.; Ochsenreither, E.; Temme, L.:**

Anwendung stochastischer Modelle für die Überprüfung der Daten aus Zustandserfassungen und die Prognose der Nutzungsdauer von Fahrbahnbefestigungen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 04.0262/2012/MRB (unveröffentlicht), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, 2013

**Hess, R.; Schweibenz, B.; Stöckner, M.; Zander, U.:**

Infrastrukturmanagement Straße – Erhaltung, Maßnahmenkoordinierung, Wirtschaftlichkeit, Vermögensbewertung. 1. Auflage, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2018

**Heunecke, O:**

Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver KALMAN-Filterung (Hannoversches Filter). Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Heft 208, Hannover, 1995

**Hicks, R. G.:**

State-of-the-art on Rutting in Asphalt Concrete. Proceedings of the 3rd IRF Middle East Regional Meeting, Vol. 6, 1988

**Hinsch, K.; Maerschalk, G.; Pingel, C.:**

Untersuchungen zur Häufigkeitsverteilung von Erhaltungsmaßnahmen und Erhaltungsintervallen aufgrund von Netzanalysen zur Fortschreibung der Bedarfsermittlung für Bundesfernstraßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 584, Bundesministerium für Verkehr, Bonn-Bad Godesberg, 1990

**Hinsch, K.; Krause, G.; Maerschalk, G., Rübensam, J.:**

Katalogisierung von beschreibenden Größen für das Gebrauchsverhalten von Fahrbahnbefestigungen und die Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 915, BMVBW, Bonn, 2005

**Hoffmann, M.:**

Instandsetzung von Straßen – Ein Beitrag zur Lebenszykluskosten und effizienten Instandsetzungsstrategien für Landes- und Gemeindestraßen. Dissertation an der Technischen Universität Graz, Graz, Österreich, 2006

---

**Hoffmann, M.:**

Lebenszykluskosten der Straßeninfrastruktur – Optimierung von Investitionsstrategien und technischen Maßnahmen, Bau- und Betriebsweisen für Straßenanlagen in ihrem Lebenszyklus. Mitteilungen des Instituts für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen, Technische Universität Wien, Wien, Österreich, **2019**

**Hoffmann, M.; Donev, V.:**

Comparison of Pavement Condition Prediction and Life Cycle Cost Models on Road Section and Network Level. in: Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure, 5th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, International Association for Life-Cycle Civil Engineering, pp. 1650-1657, Delft, Niederlande, **2014**

**Hoffmann, M.; Donev, V.:**

Introduction of a New Continuous Time and State Space Stochastic Process in Condition Prediction. International Journal of Pavement Engineering, Informa UK Limited, London, U.K., **2016**

**Hong, F.; Prozzi, J. A.:**

Updating Pavement Deterioration Models Using the Bayesian Principles and Simulation Techniques. Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, **2005**

**Hool, J. N.:**

A Dynamic Programming Markov Chain Approach to Forest Production Control. Forest Science, Issue 12, Bethesda, USA, **1966**

**Houben, E. H. P.; Huirne, R. B. M., Dijkhuizen, A. A.; Kristensen, Anders, R.:**

Optimal Replacement of Mastitis Cows determined by a hierarchic Markov Process. Journal of Dairy Science, Issue 77, pp. 2975-2993, American Dairy Science Association, Champaign, USA, **1994**

**Howard, R. A.:**

Dynamic Programming and Markov Processes. Cambridge, The M.I.T. Press., Massachusetts, USA, **1960**

**Howard, R. A.:**

Dynamic Probabilistic Systems. Volume II: Semi-Markov and Decision Processes. John Wiley and Sons Inc., Kanada, **1971**

**Hu, L. T.; Bentler, P. M.:**

Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. Structural Equation Modeling. A Multidisciplinary Journal, Issue 6, pp. 1-55, **1999**

**Hudson, W. R.; Haas, R.; Uddin, W.:**

Infrastructure Management: Integrating Design, Construction, Maintenance, Rehabilitation and Renovation. McGraw-Hill-Verlag, New York, U.S.A., **1997**

---

**Hulst, R.:**

On the dynamics of vegetation: Markov Chains as Models of Succession. *Vegetatio*, Vol. 40, pp. 3-14, Springer-Verlag, New York, U.S.A., **1979**

**Huschek, S.:**

Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe. in: *Straße und Autobahn*, S. 125-131, Kirschbaum-Verlag, Bonn, **1995**

**Huschek, S.:**

Anforderungen an die Oberflächeneigenschaften von Fahrbahnen. in: *Bitumen*, Heft 4, **1997**

**Ibe, O. C.:**

Markov Processes for Stochastic Modeling. Elsevier Academic Press, Massachusetts, USA, **2009**

**Irle, J. P.:**

Analyse und Entwurf von Beobachtern mit unbekannten Signalen und Parametern. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Karlsruhe, **2016**

**Iwojlow, V.:**

Entwicklung eines Markov-Prozess basierten Prognosemodells für den Straßenzustand. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, Stuttgart, **2014**

**Jeffers, J. N. R.:**

An Introduction to Systems Analysis: With Ecological Applications. Edward Arnold, London, U. K., **1978**

**Jia, X.; Huang, B.; Dong, Q.; Zhu, D.; Maxwell, J.:**

Influence of Pavement Condition Data Variability on Network-Level Maintenance Decision. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, No. 2589, Pavement Management, Vol. 1, Washington, D.C., USA, **2016**

**Jiang, Y.; Saito, M.; Sinha, K. C.:**

Bridge Performance Prediction Model Using the Markov Chain. *Transportation Research Record*, Issue 1180, pp. 25-32. TRB, National Research Council, Washington, D.C., **1988**

**Jiang, Y.; Sinha, K. C.:**

Bridge Performance and Optimization. Final Report, Vol. 6, West Lafayette, Indiana: Purdue University, USA, **1990**

**Kalman, R. E.:**

A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. in: *Trans. ASME, Series D, Number 82 in Journal of Basic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, New York, **1960**

---

**Kenis, W. J.; Sherwood, J. A.; McMahon, T. F.:**

Verification and Application of the VESYS Structural Subsystem. Proceedings of the 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, Delft, Niederlande, **1982**

**Kerlinger, F. N.; Pedhazur, E. J.:**

Multiple Regression in Behavioral Research – Explanation and Prediction. 3rd Edition, Christopher P. Klein (Hrsg.), New York: Holt, Rinehart & Winston, **1973**

**Klein, M.:**

Inspection–Maintenance–Replacement Schedules under Markovian Deterioration. Management Science 9, pp. 25-32, Informs, Catonsville, USA, **1962**

**Kline, R. B.:**

Principles and practice of structural equation modeling. 4th Edition, Guilford Press, New York, U.S.A., **2016**

**Klinghammer, S.; Huber, T.; Nagel, M.:**

Methodenstudie zur Verbesserung des Prognoseinstrumentariums für die langfristige Erhaltung der Bundesfernstraßen. in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 743, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, **1997**

**Knab, B.:**

Erweiterungen von Hidden-Markov-Modellen zur Analyse ökonomischer Zeitreihen. Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität zu Köln, Köln, **2000**

**Knepper, S.; Krause, G.; Maerschalk, G.; Schröder, G.:**

Erstanwendung eines Pavement Management Systems für die Erhaltungsplanung der Bundesfernstraßen. in: Straße und Autobahn, Kirschbaum-Verlag, Köln, **2003**

**Koch, R.:**

Entwicklung eines Prognosemodells zur Beschreibung der Zustandsänderungen eines ausgewählten Straßennetzes. Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum, Bochum, **1992**

**Kohlhaas, R.; Szekeresch, F.; Gindele, T.; Dillmann, R.:**

Dynamic Bayesian Network Library – Ein C++ Framework für Berechnungen auf dynamischen Bayes'schen Netzen. Institut für Anthropomatik, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, **2009**

**Komma, Ch.:**

Untersuchung über einen möglichen Zusammenhang zwischen Trassierungsparametern der Straße und den Merkmalen der Fahrbahnoberfläche. Diplomarbeit am Fachgebiet Straßenwesen der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, **2004**

**Kouba, J.:**

Markov Chains and Modelling the Long-Term Development of the Age Structure and Production of Forests. Proposal of a new Theory of the normal Forest. Forestry 26 (9), pp. 179-193, Czech Academy of Agricultural Sciences, Prag, Tschechien, **1977**

---

**Kouba, J.:**

Control of the Conversion Process towards the Stochastically defined Normal Forest by the Linear and Stochastic Programming. Forestry (35), pp. 1025-1040, Czech Academy of Agricultural Sciences, Prag, Tschechien, **1989**

**Krause, G.:**

Systematische Straßenerhaltung und Pavement Management System. Vorlesungsunterlagen Teil 1 und 2, Ingenieurbüro SEP Maerschalk, München, **2001**

**Krause, G.; Maerschalk, G.:**

Auswertung von Forschungsarbeiten zur Weiterentwicklung des Pavement Management Systems (PMS). in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1037, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn, **2010**

**Kretz, R.:**

Management der Straßenerhaltung – Sachstand und Ausblick. in: Straße und Autobahn, Heft 7, S. 518-524, Kirschbaum-Verlag, **2014**

**Kristensen, A. R.:**

Dynamic Programming and Markov Decision Processes, Dina Notat No. 49, Dept. Of Animal Science and Animal Health. Royal Veterinary and Agricultural University, Frederiksberg, Dänemark, **1996**

**Kübler, S.:**

Planung von Erhaltungsmaßnahmen aus Sicht des Bundes. in: Straße und Autobahn, Heft 7, S. 525-530, Kirschbaum-Verlag, **2014**

**Labasch, M.:**

Prognose der Vegetationsentwicklung mit Markov-Ketten. Dissertation am Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotropologie und Umweltmanagement der Justus-Liebig-Universität, Gießen, **2006**

**Leary, R. A.; Hahn, J.T.; Buchmann, R. G.:**

A Generalized Forest Growth Projection System Applied to the Lake States Region. United States Department of Agriculture (USDA) Forest Service, Gen. Tech. Rep. NC-49, pp. 79-89, Washington, D.C., USA, **1979**

**Lehmann+Partner GmbH:**

Technologie/System ARGUS. verfügbar: <http://www.lehmann-partner.de/technologie/systemstier?L=680>, aufgerufen um 18:43 am 11.03.2018

**Lenker, S.:**

Beanspruchung von bituminösen Straßenbefestigungen durch horizontale und vertikale Verkehrsbelastungen. Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.), Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 236, **1977**

**Leslie, P. H.:**

The use of matrices in certain population mathematics. Biometrika 33(3), pp. 183-212, Oxford University Press, Oxford, U.K., **1945**



---

**Leslie, P. H.:**

Some further notes on the use of matrices in population mathematics. *Biometrika*, 35(3–4), pp. 213–245, Oxford University Press, Oxford, U.K., **1948**

**Lévy, P.:**

Processus semi-markovians. *Proceedings of the International Congress of Mathematicians*, pp. 416–426, Amsterdam, Niederlande, **1954**

**Li, N.:**

Development of a Probabilistic Based. Integrated Pavement Management System, Dissertation, University of Waterloo, Waterloo, Kanada, **1997**

**Li, N.; Xie, W.-C.; Haas, R.:**

Reliability-Based Processing of Markov-Chains for Modeling Pavement Network Deterioration. *Transportation Research Record Vol. 1524*, Washington, D.C., USA, **1996**

**Li, Z.:**

A Probabilistic and Adaptive Approach to Modeling Performance of Pavement Infrastructure. Dissertation, University of Texas, Austin, USA, **2005**

**Little, T.:**

Longitudinal Structural Equation Modeling. The Guilford Press, New York, USA, **2013**

**Löcherer, L.:**

Bestandsdokumentation und Zustandserfassung. in: *Straße und Autobahn*, S. 343–348, Kirschbaum-Verlag, Bonn, **2015**

**Loehlin, J. C.:**

Latent variable models. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, **1987**

**Loizos, A.; Karlaftis, M.:**

Pavement Crack Initiation Prediction from in-service Pavements: A Duration Model Approach. *Transportation Research Record (1940)*, pp. 38–42, Washington, D.C., USA, **2005**

**Lounis, Z.; Mirza, M. S.:**

Reliability-based Service Life Prediction of Deteriorating Concrete Structures. *Journal of Central South University of Technology*, Springer Nature, London, U.K., **2001**

**Lüdtke, O.; Robitzsch, A.; Trautwein, U.; Köller, O.:**

Umgang mit fehlenden Werten in der psychologischen Forschung – Probleme und Lösungen. *Psychologische Rundschau (58)*, S. 103–117, **2007**

**Lytton, R. L.:**

Concepts of Pavement Performance Prediction and Modeling. *Proceedings, Second North American Conference on Managing Pavements, Vol. II*, pp. 2.3–2.19, Toronto, Kanada, **1987**

---

**Madanat, S.; Ben-Akiva, M.:**

Optimal Inspection and Repair Policies for Infrastructure Facilities. *Transportation Science* 28, pp. 55-62, Informa, Catonsville, USA, **1994**

**Madanat, S., Mishalani, R., Wan Ibrahim, W. H.:**

Estimation of Infrastructure Transition Probabilities from Condition Rating Data. *Journal of Infrastructure Systems*, 1(2), pp. 120-125, Reston, USA, **1995**

**Maerschalk, G.; Rübensam, J.:**

Auswertung von Straßenzustandsmerkmalen im Straßennetz des ehemaligen DDR-Gebietes. in: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 632, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Bonn-Bad Godesberg, **1992**

**Maerschalk, G.:**

Erstellung einer ablauffähigen Folge von Algorithmen für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen und der Mittelverwendung im Rahmen eines PMS. in: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 751, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, **1997**

**Maerschalk, G.:**

Erhaltungsbedarf für Bundesfernstraßen, Landesstraßen und Kommunalstraßen: Kurzbericht. Ingenieurbüro SEP Maerschalk, München, **1999**

**Maerschalk, G.:**

Entwicklung eines Pavement Management Systems für die Erstanwendung in Deutschland. *Deutscher Straßen- und Verkehrskongress 2000*, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hamburg, **2001**

**Maerschalk, G.; Krause, G.:**

Erstanwendung der vorliegenden Algorithmen für die Erhaltungsplanung in ausgewählten Bauämtern. in: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 878, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr (Hrsg.), Bonn-Bad Godesberg, **2004**

**Maerschalk, G.; Socina, M.:**

Weiterentwicklung der Bewertung des Pavement Management Systems (PMS) um ein Verfahren für die Umsetzung von Qualitätszielen. in: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 1001, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr (Hrsg.), Bonn, **2008**

**Maerschalk, G.; Ueckermann, A.; Heller, S.:**

Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung. in: *Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Straßenbau*, Heft S 73, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, **2011**

**Maerschalk, G.; Krause, G.; Socina, M.; Köhler, M.; Stöckner, M.:**

Daten und Methoden für ein systematisches Erhaltungsmanagement innerörtlicher Straßen. in: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 1079, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr (Hrsg.), Carl Schünemann Verlag, Bremen, **2012**

---

**Maerschalk, G.:**

Aufgabenorientierte und ganzheitliche Ermittlung des Erhaltungsbedarfs. in: Tagungsband Arbeitsgruppentagung Infrastrukturmanagement, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, **2013**

**Maerschalk, G.; Krause, G.; Stöckert, U.; Zander, U.:**

Entwicklung der Methoden zur Ermittlung des Erhaltungs- und Finanzbedarfs für Bundesfernstraßen. in: Straße und Autobahn, Heft 3, S. 207-222, Kirschbaum-Verlag, Bonn, **2020**

**Marchthaler, R.; Dingler, S.:**

Kalman-Filter – Einführung in die Zustandsschätzung und ihre Anwendung für eingebettete Systeme. Springer Vieweg, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, **2017**

**Mašović, S.; Hajdin, R.:**

Modelling of bridge elements deterioration for Serbian bridge inventory. Structure and Infrastructure Engineering, 10:8, pp. 976-987, **2014**

**Micevski, T.; Kuczera, G.; Coombes, P.:**

Markov Model for Storm Water Pipe Deterioration. Journal of Infrastructure Systems, American Society of Civil Engineers, Vol. 8(2), pp. 49-56, Reston, USA, **2002**

**Mills, L. N. O.; Attoh-Okine, N. O.; McNeil, S.:**

Hierarchical Markov Chain Monte Carlo Simulation for Modeling Transverse Cracks in Highway Pavements. Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 138, (6), pp. 700-705, Reston, USA, **2012**

**Mishalani, R. G.; Madanat, S. M.:**

Computation of Infrastructure Transition Probabilities Using Stochastic Duration Models. Journal of Infrastructure Systems, American Society of Civil Engineers, Vol. 8, (4), pp. 113-120, Reston, USA, **2002**

**Mitschke, M.:**

Dynamik der Kraftfahrzeuge. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, **1972**

**Molzer, C.; Felsenstein, K.; Viertl, R.; Litzka, J.; Vycudil, A.:**

Statistische Methoden zur Auswertung von Straßenzustandsdaten. Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 499, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, Österreich, **2000**

**Morcous, G.; Akhnoukh, A. K.:**

Stochastic Modeling of Infrastructure Deterioration: An Application to Concrete Bridge Decks. Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montreal, Kanada, **2006**

**Nasseri, S.; Gunaratne, M.; Yang, J.; Nazef, A.:**

Application of improved crack prediction methodology in Florida's highway network. Transportation Research Record, pp. 67-75, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, **2009**

---

**National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine:**

Guide for Pavement-Type Selection. The National Academies Press, Washington, D.C., USA, **2011**

**Neitzel, F.:**

Ausgleichsrechnung – Modellbildung, Auswertung, Qualitätsbeurteilung. in: Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswerteverfahren, Beiträge zum 93. DVW-Seminar am 10. und 11.06.2010 in Hannover, DVW-Schriftenreihe Band 61/2010, S. 95-127, **2010**

**Neumann, D.:**

Kalman-Filter und Partikelfilter zur Selbstlokalisierung – Ein Vergleich. Fachgebiet Psychologie, Justus-Liebig-Universität Gießen, Gießen, **2002**

**Newsom, J. T.:**

Longitudinal Structural Equation Modeling – A Comprehensive Introduction. Routledge Verlag, Taylor & Francis Group, New York, London, **2015**

**Ng, S.-K.:**

Survival Analysis and Semi-Markov Bridge Deterioration Modeling. PhD-Thesis, University of Pittsburgh, Pittsburgh, USA, **1996**

**Ng, S.-K.; Moses, F.:**

Bridge Deterioration Modeling using Semi-Markov Theory. Structural Safety and Reliability 1, pp.113–120, Rotterdam, Niederlande, **1998**

**Ng, S.-K.; Moses, F.:**

Optimal Policy for Civil Infrastructure Systems using Semi-Markov Decision Process. Committee Report Paper: Case Studies in Optimal Design and Maintenance Planning of Civil Infrastructure Systems, American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 202–215, Reston, USA, **1999**

**Ninomiya, Y.; Mizutani, D.; Kaito, K.:**

Modeling the Pothole Generation Process by Composite Statistical Models for Pavement Management on Expressway Bridges. World Conference on Pavement and Asset Management (WCPAM), Mailand, Italien, **2017**

**Oefner, G.:**

Technologische und wirtschaftliche Trendmodelle – Zum Problem der Ungewissheit in Wirtschaftlichkeitsrechnungen, Optimierung von Instandsetzungsstrategien und Einführung technologischer und wirtschaftlicher Trendmodelle in Wirtschaftlichkeitsrechnungen. in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 438, Bundesminister für Verkehr (Hrsg.), Bonn, **1985**

**Oertelt, St.:**

Empirische Absicherung der Verhaltensfunktionen für Wirtschaftlichkeitsrechnungen und PMS-Anwendungen. in Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 965, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Straßenbau, Bonn, **2007**

---

**Oeser, M.; Kemper, D.; Wang, D.; Vallée, D.; Schneider, M.:**

Entwicklung von Prognosefunktionen für den Straßenzustand kommunaler Straßen. in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Straßenbau, Bonn, **2014**

**Oeser, M.; Wellner, F.; Zeißler, A.; Kayser, S.:**

Weiterentwicklung der rechnerischen Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht. Vortrag auf der FGSV-Arbeitsgruppentagung Infrastrukturmanagement, 15.-16.02.2017, Duisburg, **2017**

**Park, E.; Smith, R.; Freeman, T.; Spiegelmann, C.:**

A Bayesian Approach for Improved Pavement Performance Prediction. Journal of Applied Statistics, Vol. 35, No. 11, Routledge Taylor & Francis Group, London, U.K., **2008**

**Paterson, W.:**

Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management. MD: The Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA, **1987**

**Pearl, J.:**

Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems. Revised 2nd printing, Morgan Kaufmann Publishers Inc., **1988**

**Pearl, J.**

Graphs, Causality, and Structural Equation Models. Sociological Methods and Research 27 (2), pp. 226-284, Sage Publications, Thousand Oaks, USA, **1998**

**Pierce, L. M.; McGovern, G.; Zimmerman, K. A.:**

Practical Guide for Quality Management of Pavement Condition Data Collection. Report No. FHWA-HIF-14-006. Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA, **2013**

**Pierce, L. M.; Zimmerman, K. A.:**

Practical Guide for Quality Management of Pavement Condition Data Collection. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA, **2014**

**Preacher, K.; Wichman, A.; MacCallum, R. C.; Briggs, N. E.:**

Latent Growth Curve Modeling. Series: Quantitative Applications in the Social Sciences, Sage Publications, Thousand Oaks, USA, **2008**

**Prozzi, J. A.; Madanat, S. M.:**

Using Duration Models to Analyze Experimental Pavement Failure Data. Transportation Research Record (1699), pp. 87-94, Washington, D.C., USA, **2000**

**Prozzi, J. A.; Serigos, P. A.; Kim, M. Y.; Xu, H.:**

Deterioration Modelling of Preventive Maintenance Treatments for Flexible Pavements. Final Project Report, University Transportation Center for Highway Pavement Preservation, Austin, Texas, USA, **2017**

---

**Rabiner, L.:**

A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition. Proceedings of the IEEE, Vol. 77, Issue 2, pp. 257-286, Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York, USA, 1989

**Rafi, A. A.:**

Management der Straßenerhaltung – Grundlagen, Thesen, Strategien. Verlag Industrielle Organisation Zürich, Verlag Schück Söhne AG Rüschlikon, Zürich, 1985

**Ramm, K.:**

Evaluation von Filter-Ansätzen für die Positionsschätzung von Fahrzeugen mit den Werkzeugen der Sensitivitätsanalyse. Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2008

**Ravirala, V.; Grivas, D.A.:**

State Increment Method of Lifecycle Cost Analysis for Highway Management. Journal of Infrastructure Systems, Vol. 1(3), pp. 151-159, American Society of Civil Engineers, Reston, 1995

**Reger, D; Christofa, E.; Guler, I.; Madanat, S.:**

Estimation of Pavement Crack Initiation Models by Combining Experimental and Field Data. Journal of Infrastructure Systems (19), Issue 4, pp. 434-441, American Society of Civil Engineers, Reston, USA, 2013

**Ressel, W.; Benner, A.; Wellner, F.; Werkmeister, S.; Lipke, S.:**

Vergleichende Bewertung der Restsubstanz von Asphaltbefestigungen nach langjähriger Verkehrsnutzung. Forschungsprojekt am Institut für Straßen- und Verkehrswesen Universität Stuttgart, Stuttgart, 2008

**Ressel, W.; Tejkl, K.; Klöpfer, Ch.:**

Methodenstudie zur Life-Cycle-Bewertung von Straßenbefestigungen. in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 438, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Bonn, 2013

**Rimpler, A.:**

Qualitätssicherung bei zensierten Daten – Statistische Verfahren zur Entscheidungsfindung. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 1997

**Rodner, E.; Süße, H.:**

Bildverarbeitung und Objekterkennung – Computer Vision in Industrie und Medizin. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2014

**Rosauer, V.:**

Abschätzung der herstellungsbedingten Qualität und Lebensdauer von Asphaltdeckschichten mit Hilfe der Risikoanalyse. Dissertation am Fachgebiet Straßenwesen der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2010

---

**Rosauer, V.; Buscham, B.; Blumenfeld, T.:**

Überprüfung der Präzision des Seitenkraftmessverfahrens (SKM) – Ergebnisse der Vergleichsfahrt der Gütegemeinschaft Griffigkeitsmessungen. in: Straße und Autobahn, Heft 2, S. 110-116, Kirschbaum-Verlag, Bonn, **2017**

**Rosseel, Y.:**

lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. Journal of Statistical Software (48), Issue 2, American Statistical Association, Boston, U.S.A., **2012**

**RDO Asphalt:**

Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt) Ausgabe 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Best.-Nr. 498, FGSV-Verlag, Köln, **2009**

**RPE-Stra 01:**

Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Stra). Ausgabe 2001, Best.-Nr. 988, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2001**

**RPE-Stra:**

Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Stra). überarbeitete Fassung des Arbeitskreises 4.1.1: Entscheidungsvorbereitung im Erhaltungsmanagement, FGSV-Nr. 488, FGSV-Verlag, Köln, **in Vorbereitung**

**RSO Asphalt:**

Richtlinien zur Beurteilung der strukturellen Substanz von Asphaltstraßen (RSO Asphalt) Entwurfsfassung 2015, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2015**

**RStO:**

Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO). Ausgabe 2012, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr. 499, FGSV Verlag, Köln, **2012**

**Rübensam, J.; Schulze, F.:**

Auswertung von Langzeitbeobachtungsdaten zur Beantwortung von Fragestellungen des Managements der Straßenerhaltung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 712, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg, **1994**

**Rübensam, J.; Schulze, F.:**

Entwicklung einer Methodik zur zweckmäßigen Zusammenfassung maßnahmebedürftiger Abschnitte der BAB-Betriebsstrecken auf der Grundlage von Zustands- und Bestandsdaten. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 736, Bundesministerium für Verkehr, **1996**

**Rudra, A.B.:**

A Stochastic Model for the Prediction of Diameter Distribution of even-aged Forest Stands. OPSEACH, Journal of Operational Society of India, Vol. 5 (2), pp. 59-73, Kalkutta, Indien, **1968**

**Saliminejad, S.:**

Quantitative Risk Assessment for Performance-Based Pavement Management Systems. Transportation Research Board – Annual Meeting 2016, Washington, D.C., USA, **2016**

---

**Samek, G.:**

Pavement Management Systeme im kommunalen Strassenbau. Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, Wien, Österreich, **2005**

**Scazziga, I.:**

Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Schadensprozesse und Zustandsverläufe. Schlussbericht VSS 2004/712, Bundesanstalt für Strassen, Bern, Schweiz, **2008**

**Schermelleh-Engel, K.; Moosbrugger, H.; Müller, H.:**

Evaluating the fit of structural equation models: Tests of significance and descriptive goodness-of-fit measures. *Methods of Psychological Research Online*, 8(2), S. 23-74, **2003**

**Schmidt, J.:**

Vergleichs- und Wiederholstreibereiche für Längs- und Querebenheit. in: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 1031, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (Hrsg.), Bonn, **2010**

**Schmiedek, F.; Wolff, J.K.:**

Latente Wachstumskurvenmodelle. in: Wolf, C.; Best, H.: *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse*, S. 1017-1030, VS Verlag, Wiesbaden, **2010**

**Schmuck, A.; Oefner, G.; Rezanka, S.:**

Strategiemodellverfahren zur Ermittlung des Finanzbedarfs für die Erhaltung des Straßenoberbaues. Bundesminister für Verkehr (Hrsg.), in: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 456, **1985**

**Schmuck, A.:**

Management der Straßenerhaltung – Ein interdisziplinärer Arbeits- und Forschungsbereich. in: *Bitumen*, Heft 1, Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V., Hamburg, **1987a**

**Schmuck, A.:**

Straßenerhaltung mit System – Grundlagen des Managements. Kirschbaum Verlag, Bonn, **1987b**

**Schmuck, A.; Maerschalk, G.:**

Auswirkung von aufgeschobenen Erhaltungsmaßnahmen auf den mittel- bis langfristigen Finanzbedarf für die Straßenerhaltung. in: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 501, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Bonn-Bad Godesberg, **1987**

**Schmuck, A.; Hehenberger, F.:**

Mängelursachen, Erhaltungsmaßnahmen und Auswirkungen auf das Zustandsniveau – Entwicklung einer Systematik für das Management der Straßenerhaltung. in: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 652, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Bonn-Bad Godesberg, **1993**

**Schrick, K. W.:**

Anwendungen der Kalman-Filter-Technik. Oldenbourg Verlag, München, **1997**



---

**Schröder, G.:**

Erhaltungsplanung für den Bundesverkehrswegeplan. in: Straße und Autobahn, Heft 7, S. 511-517, Kirschbaum-Verlag, **2014**

**Schulze, K.-H.:**

Unfallzahlen und Griffigkeit – Untersuchungen über die Verkehrssicherheit bei Nässe. in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 139, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Bonn-Bad Godesberg, **1975**

**Shin, H. C.; Madanat, S.:**

Development of Stochastic Model of Pavement Distress Initiation. Journal of Infrastructure Planning and Management (744), Issue IV-61, pp. 61-67, Japan Society of Civil Engineers, Tokio, Japan, **2003**

**Simpson, A.; Bryce, J.; Rada, G.; Groeger, J.:**

Time Series Review of HPMS Data. Transportation Research Board – Annual Meeting 2018, Washington, D.C., USA, **2018**

**Skakuj, M.; Komma, Ch.:**

ZEB-Dauermessstrecken A5 – Datenkonsolidierung und Visualisierung. Schlussbericht, Darmstadt, **2016**

**Sloboda, B.:**

Mathematische und stochastische Modelle zur Beschreibung der Statik und Dynamik von Bäumen und Beständen – insbesondere das bestandsspezifische Wachstum als stochastischer Prozess. Universität Freiburg, Freiburg, **1976**

**Smith, W. L.:**

Regenerative Stochastic Processes. Proceedings of the Royal Society, Series A, 232, pp. 6-31, University Press of Cambridge, Cambridge, U.K., **1955**

**Smith, W.; Finn, F.; Kulkarni, R.:**

Bayesian Methodology for Verifying Recommendations to Minimize Asphalt Pavement. NCHRP Report 213, Transportation Research Board, National Council, Washington, D.C., USA, **1979**

**Sobanjo, J. O.:**

State Transition Probabilities in Bridge Deterioration based on Weibull Sojourn Times. Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, Vol. 7(10), pp. 747-764, USA, **2011**

**Socina, M.:**

Erweiterung der Nutzung von Straßenzustandsdaten in der systematischen Straßenerhaltung. Dissertation an der TU Wien, Wien, **2007**

**Socina, M.; Komma, Ch.:**

Kennzahlen für die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsstrategien. in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1113, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Bonn, **2015**

---

**Solorio, R.; Flintsch, G.; Garnica, P.; Moreno, F.:**

Modeling Roughness Progression in Mexican Roads Using Historical Data. World Conference on Pavement and Asset Management (WCPAM), Mailand, Italien, **2017**

**Sousa, J. B.; Craus, J.; Monismith, C. L.:**

Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete. Strategic Highway Research Program SHRP-A-318, **1994**

**Steckel, H.; Vanhonacker, W. R.:**

Cross-Validating Regression Models in Marketing Research. in: Marketing Science (12), S. 415-427, Institute for Operations Research and the Management Sciences, Catonsville, U.S.A., **1993**

**Steinauer, B.; Oeser, M.; Meyer, A.; Ueckermann, A.; Schulze, Ch.; Schacht, A.; Wang, D.; Kubasch, J.; Kartzow, M.:**

Berührungslose Griffigkeitsmessung: Entwicklung eines dynamischen Messverfahrens zur berührungslosen Bestimmung der Fahrbahngriffigkeit. BMWI-Forschungsbericht, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, **2012**

**Steinmetz, H.:**

Lineare Strukturgleichungsmodelle – Eine Einführung mit R. in: Sozialwissenschaftliche Forschungsmethoden, Band 9, 2. Auflage, Rainer Hampp Verlag, München und Mering, **2015**

**Stephens, G. R.; Waggoner, P. E.:**

The Forests anticipated from 40 years of Natural Transitions in mixed Hardwoods. Connecticut Agricultural Experiment Station, Bulletin 707, pp. 58 ff., New Haven, USA, **1970**

**Stöckert, U.; Glattki, W.; Wasser, B.:**

Zustandserfassung von Oberflächen. in: Straße und Autobahn, Heft 9, S. 696-705, Kirschbaum-Verlag, Bonn, **2014**

**Stöckert, U.; Schmerbeck, R.; Lau, F.:**

Erhaltungsmanagement der Bundesfernstraßen. in: Straße und Autobahn, Heft 5, S. 399-409, Kirschbaum-Verlag, Bonn, **2019**

**Straube, E.; Beckedahl, H.:**

Straßenbau und Straßenerhaltung: Ein Handbuch für Studium und Praxis. 6., durchgesehene Auflage, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin, **2000**

**Stütze, T.:**

Volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswerte für die Erhaltung von Bundesautobahnen. Dissertation an der Technischen Universität Berlin, Berlin, **2004**

**Suß, G.; Krüger, W.:**

Vergleichende Zustandserfassung und -bewertung unterschiedlicher Konzepte der Länder Bundesrepublik Deutschland, Frankreich und Schweiz – Erweiterte Analyse und Beurteilung zur vergleichenden Zustandserfassung und -bewertung unterschiedlicher Konzepte der Länder Bundesrepublik Deutschland, Frankreich und Schweiz. in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 671, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Bonn-Bad Godesberg, **1992**

---

**Tabatabaee, N.; Ziyadi, M.:**

Bayesian Approach to Updating Markov-Based Moduls for Predicting Pavement Performance. Transportation Research Record, Washington, D.C., USA, **2013**

**Takács, L.:**

Some investigations concerning recurrent stochastic processes of a certain type. Magyar Tud. Akad. Mat. Kutato Int. Kzl., Vol. 3, pp. 115-128, American Mathematical Society, Providence, Rhode Island, USA, **1954**

**Tanaka, J. S.:**

„How big is big enough?“ Sample size and goodness of fit in structural equation models with latent variables. Child Development (58), S. 134-146, **1987**

**Tam, W. O.; Quintus, H. V.:**

Use of long-term pavement performance data to develop traffic defaults in support of mechanistic-empirical pavement design procedures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (TRB), Issue 1855, pp. 176-182, Washington, D.C., U.S.A., **2003**

**Thomas, O.:**

Stochastic Preservation Model for Transportation Infrastructure. Florida State University Libraries, College of Engineering, Florida, USA, **2011**

**Thomas, O.; Sobanjo, J.:**

Semi-Markov Models for the Deterioration of Bridge Elements. Journal of Infrastructure Systems, American Society of Civil Engineers, Reston, USA, **2016**

**Thompson, P. D.; Small, E. P.; Johnson, M.; Marshall, A. R.:**

The Pontis Bridge Management System. Structural Engineering International, Vol. 8, pp. 303-308, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Zürich, Schweiz, **1998**

**TP Eben – Berührende Messungen:**

Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung – Teil: Berührende Messungen (TP Eben – Berührende Messungen). Ausgabe 2007, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr. 404, FGSV-Verlag, Köln, **2007**

**TP Griff-StB:**

Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau – Teil: Messverfahren SCRIM (TP Griff-StB). Ausgabe 2001, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln, **2001**

**TP Griff-StB (SKM)**

Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau – Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM) (TP Griff-StB (SKM)). Ausgabe 2007, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr. 408/1, FGSV-Verlag, Köln, **2007**

**Tschirk, W.:**

Statistik: Klassisch oder Bayes – Zwei Wege im Vergleich. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, **2014**

---

**TÜV Rheinland Schniering GmbH:**

Zustandserfassung und -bewertung mit dem Messsystem ARGUS. Essen, **2018**

**Uddin, W.; Hudson, W.R.; Haas, R.:**

Public Infrastructure Asset Management. 2nd Edition, McGraw-Hill Education, New York, USA, **2013**

**Ueckermann, A.:**

Der Längsebenheitswirkindex LWI. in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 839, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Bonn, **2002**

**Urban, D.:**

Neue Methoden der Längsschnittanalyse – Zur Anwendung von latenten Wachstumskurvenmodellen in Einstellungs- und Sozialisationsforschung. Band 2, LIT Verlag, Münster, **2004**

**Urban, D.; Mayerl, J.:**

Strukturgleichungsmodellierung: Ein Ratgeber für die Praxis. Springer VS, Wiesbaden, **2014**

**Usher, M. B.:**

Markovian Approaches to Ecological Succession. Journal of Animal Ecology, Vol. 48, No. 2, pp. 413-426, British Ecological Society, London, U.K., **1979**

**Usher, M. B.:**

Modelling ecological succession, with particular reference to Markovian models. In: Poissonet P., Romane F., Austin M.A., van der Maarel E., Schmidt W. (eds) Vegetation dynamics in grasslands, heathlands and mediterranean ligneous formations. Advances in vegetation science, Vol 4. Springer-Verlag, Dordrecht, Niederlande, **1981**

**Van Dam, T. J.; Chester, A. D.; Peshkin, D. G.:**

Evaluation of LTP data using HDM-III Probabilistic Failure-time Models for Crack Initiation in Bituminous Pavements. Transportation Research Record (1592), pp. 125-133, Washington, D.C., USA, **1997**

**Vanclay, J. K.:**

Compatible Deterministic and Stochastic Predictions by Probabilistic Modeling of Individual Trees. Forest Science, Vol. 37, No.6, pp. 1656-1663, **1991**

**Vanclay, J. K.:**

Modelling Forest Growth and Yield – Applications to Mixed Tropical Forests. CAB International, Wallingford, UK, **1994**

**Villaret, S.; Wellner, F.:**

Möglichkeiten der Prognose von Zustandsmerkmalen der Straßenoberfläche. in: Bitumen, 64. Jahrgang, Heft 3, Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V., Hamburg, **2002**

---

**Waldmann, K.-H.; Stocker, U. M.:**

Stochastische Modelle – Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013

**Wang, C. P.:**

Pavement Network Optimization and Analysis. PhD Thesis, Arizona State University, Tempe, USA, 1992

**Wang, C. P.; Zaniewski, J.; Way, G.:**

Probabilistic Behavior of Pavements. Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 120(3), pp. 358-375, Reston, USA, 1994

**Wang, Y.; Mahboub, K. C.; Hancher, D. E.:**

Survival Analysis of Fatigue Cracking for Flexible Pavements based on long-term Pavement Performance Data. Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 131(8), pp. 608-616, Reston, USA, 2005

**Wehner, B.; Siedek, P.; Schulze, K.-H.:**

Handbuch des Straßenbaus – Band 1: Grundlagen und Entwurf. Springer-Verlag – Berlin, Heidelberg, New York, 1979

**Weiber, R.; Mühlhaus, D.:**

Strukturgleichungsmodellierung – Eine anwendungsorientierte Einführung in die Kausalanalyse mit Hilfe von AMOS, SmartPLS und SPSS. Zweite, erweiterte und korrigierte Auflage, Springer Gabler, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014

**Weidich, P.:**

Die Ermittlung einer Bewertungsskala für das Griffigkeitsmesssystem GripTester unter Berücksichtigung der Bewertungsskala des SKM. Dissertation am Fachgebiet Straßenwesen der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2009

**Wellalage, N. K. W.; Zhang, T.; Dwight, R.:**

Calibrating Markov Chain-Based Deterioration Models for Predicting Future Conditions of Railway Bridge Elements. Journal of Bridge Engineering, Vol. 20, Issue 2, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, USA, 2014

**Wellner, F.; Kayser, S.; Kuhlisch, W.; Kiehne, A.:**

Erarbeitung probabilistischer Verfahrensweisen für die rechnerische Dimensionierung von Fahrbahnbefestigungen mit Asphaltdecken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Bonn, 2013

**Welsch, W.; Heunecke, O.; Kuhlmann, H.:**

Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. In: Möser M, Müller G, Schlemmer H, Werner H (Hrsg.), Handbuch Ingenieurgeodäsie, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000

---

**Weninger-Vycudil, A.:**

Entwicklung von Systemelementen für ein österreichisches PMS. Dissertation, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, Wien, Österreich, **2001**

**Weninger-Vycudil, A.; Samek, G.; Rohringer, T.:**

Section Based Probabilistic Performance Prediction – Fiction or Future?. PMS-Consult, Wien, **2008**

**Weninger-Vycudil, A.; Simanek, P.; Rohringer, T.; Haberl, J.:**

Handbuch Pavement Management in Österreich. PMS Consult, Wien, Österreich, **2009**

**Weninger-Vycudil, A.; Brozek, B.; Simanek, P.; Litzka, J.:**

Handbuch Pavement Management in Österreich. Version 2016, PMS Consult, Wien, Österreich, **2016**

**Weninger-Vycudil, A.; Litzka, J.; Brozek, B.; Wistuba, M.; Walther, A.; Hajdin, R.; Schiffmann, F.; Peyerl, M.:**

Zustandsprognose und Materialtechnologie (PROMAT). Schlussbericht, Forschungsprojekt i. A. des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, der ÖBB-Infrastruktur Aktiengesellschaft und der Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG), Österreichische Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF2013), Wien, Österreich, **2016**

**Wermuth, T.:**

Lebenskostenplanung für den Straßenoberbau mittels Markov-Prozess vor dem Hintergrund des Public Private Partnership. Schriftenreihe Straßenwesen, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, **2012**

**Weston, R.; Gore, P. A.:**

A brief guide to structural equation modeling. The Counseling Psychologist (34), pp. 719-751, **2006**

**Wichern, B.:**

Hidden-Markov-Modelle zur Analyse und Simulation von Finanzzeitreihen. Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität zu Köln, Köln, **2001**

**Wilrich, P.-Th.:**

Grenzwerte und Erfüllung der Forderungen. DIN Fachbericht 6, Beuth-Verlag , Berlin, **1989**

**Winfrey, R.; Howell, P. D.:**

Highway Pavements – Their Services Lives. Highway Research Record (252), Washington, D.C., USA, **1968**

**Yandell, W. O.:**

Measurement and Prediction of Forward Movement and Rutting in Pavements Under Repetitive Wheel Loads. Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, **1982**

**Yang, J.:**

Road Crack Condition Performance Modeling Using Recurrent Markov Chains and Artificial Neural Networks. Dissertation an der University of South Florida, **2004**

---

**Yang, J.:**

Nested Markov Decision Framework for Coordinating Pavement Improvement with Capacity Expansion. Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers, Reston, USA, **2012**

**Yang, J.; Gunaratne, M.; Lu, J. J.; Dietrich, B.:**

Use of Recurrent Markov Chains for Modeling the Crack Performance of Flexible Pavements. Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 131(11), pp. 861-872, Reston, USA, **2005**

**Yang, J.; Lu, J. J.; Gunaratne, M.; Dietrich, B.:**

Modeling Crack Deterioration of Flexible Pavements: Comparison of Recurrent Markov Chains and Artificial Neural Networks. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1974, pp. 18- 25, Washington, D.C., USA, **2009**

**Yoo, C.; Oh, S.:**

Combining Structure Equation Modeling with Bayesian Networks for predictiong with high accuracy of recommending surgery for better survival in Benign prostatic hyperplasia patients. 20th International Congress on Modelling and Simulation, pp. 2029-2033, Adelaide, Australia, **2013**

**Zander, U.:**

Integration der Substanzbewertung in die Erhaltungsplanung. in: Straße und Autobahn, S. 351-356, Kirschbaum-Verlag, Bonn, **2017**

**Zavitski, J. L.; Piane, R. R.:**

30 Years – 20 State DOTs – Trends in Pavement Management observed through real world implementation at the State DOT Level. 9th International Conference on Managing Pavement Assets, Washington, D.C., USA, **2015**

**ZTV BEA-StB:**

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Asphaltbauweisen (ZTV BEA-StB). Ausgabe 2009, Fassung 2013, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr. 798, FGSV-Verlag, Köln, **2009**

**ZTV BEB-StB:**

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen (ZTV BEB-StB). Ausgabe 2015, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr. 898, FGSV-Verlag, Köln, **2015**

**ZTV ZEB-StB:**

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen (ZTV ZEB-StB). Ausgabe 2006, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr. 998, FGSV-Verlag, Köln, **2006**

**ZTV ZEB-StB:**

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen (ZTV ZEB-StB). Ausgabe 2006 mit Korrekturblatt und Änderung von Anhang 8, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr. 998, FGSV-Verlag, Köln, **2018**

---

**Zucchini, W.; MacDonald, I.:**

Hidden Markov Models for Time Series – An Introduction Using R. Journal of Statistical Software (43), Issue 4, American Statistical Association, Boston, U.S.A., **2011**



---

**Gesetzestexte:****BGB (2017):**

Bürgerliches Gesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. Januar 2002 (BGBl. I S. 42, 2909; 2003 I S. 738), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2787) geändert worden ist.

**BHO (2017):**

Bundeshaushaltsordnung vom 19. August 1969 (BGBl. I S. 1284), die zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 14. August 2017 (BGBl. I S. 3122) geändert worden ist.

**FStrG (2017):**

Bundesfernstraßengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. Juni 2007 (BGBl. I S. 1206), das zuletzt durch Artikel 17 des Gesetzes vom 14. August 2017 (BGBl. I S. 3122) geändert worden ist.

**GG (2019):**

Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 100- 1, veröffentlichten bereinigten Fassung, das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. November 2019 (BGBl. I S. 1546) geändert worden ist.

---

## **Anlagenverzeichnis**

---

**A1 Mess- und Auswertegenauigkeiten der Zustandsgrößen**

**A2 Erzeugung nutzerspezifischer ERG-Tabellen**

**A3 Simulation zur Parametrisierung des Kalman-Filters**

**A4 Ergebnisse der Strukturgleichungsmodellierung**

**A5 Ergebnisse des Wilcoxon-Mann-Whitney-Tests**

## A1 Mess- und Auswertegenauigkeiten der Zustandsgrößen

Nachfolgend sind die geforderten Mess- und Auswertegenauigkeiten je Zustandsgröße und Anwendungsfall nach den ZTV ZEB-StB [2006] dargestellt:

Tabelle 39: Geforderte Mess- und Auswertegenauigkeit zur Qualitätssicherung von Zustandsdaten (Asphaltbauweise) [ZTV ZEB-StB 2006]

Zustandsmerkmal	Zustandsgröße (ZG)	Einheit	Anwendungsbereich	Differenz der Mittelwerte ( $\Delta ZG$ )	Standardabweichung ( $\sigma ZG$ )	Bedingung
Ebenheit im Längsprofil	AUN	[cm <sup>3</sup> ]	zeitbefristete Betriebszulassung, Eigenüberwachung	0,2	0,4	AUN < 3,0 cm <sup>3</sup>
				0,4	0,8	AUN ≥ 3,0 cm <sup>3</sup>
			Kontrollprüfung	0,3	0,6	AUN < 3,0 cm <sup>3</sup>
				0,6	1,0	AUN ≥ 3,0 cm <sup>3</sup>
	W	[-]	zeitbefristete Betriebszulassung, Eigenüberwachung, Kontrollprüfung	0,2	0,4	–
Ebenheit im Querprofil	MSPT	[mm]	zeitbefristete Betriebszulassung, Eigenüberwachung	0,7	1,5	–
			Kontrollprüfung	1,0	2,5	–
	MSPH	[mm]	zeitbefristete Betriebszulassung, Eigenüberwachung	0,7	1,5	–
			Kontrollprüfung	1,0	2,5	–
	QN	[%]	zeitbefristete Betriebszulassung, Eigenüberwachung	0,3	0,5	–
			Kontrollprüfung	0,3	0,8	–
Griffigkeit	GRI	[-]	zeitbefristete Betriebszulassung, Eigenüberwachung	0,025	0,03	–
			Kontrollprüfung	0,035	0,05	–
Substanzmerkmale (Oberfläche)	RISS	[%]	Eigenüberwachung, Kontrollprüfung	0,5	0,5	ZW ≥ 2,0
	FLI	[%]				

## A2 Erzeugung nutzerspezifischer ERG-Tabellen

Die folgende Vorgehensweise wurde in Kapitel 4 angewendet, um ERG-Tabellen mit einer nutzerspezifischen Länge der Auswerteabschnitte zu erzeugen.

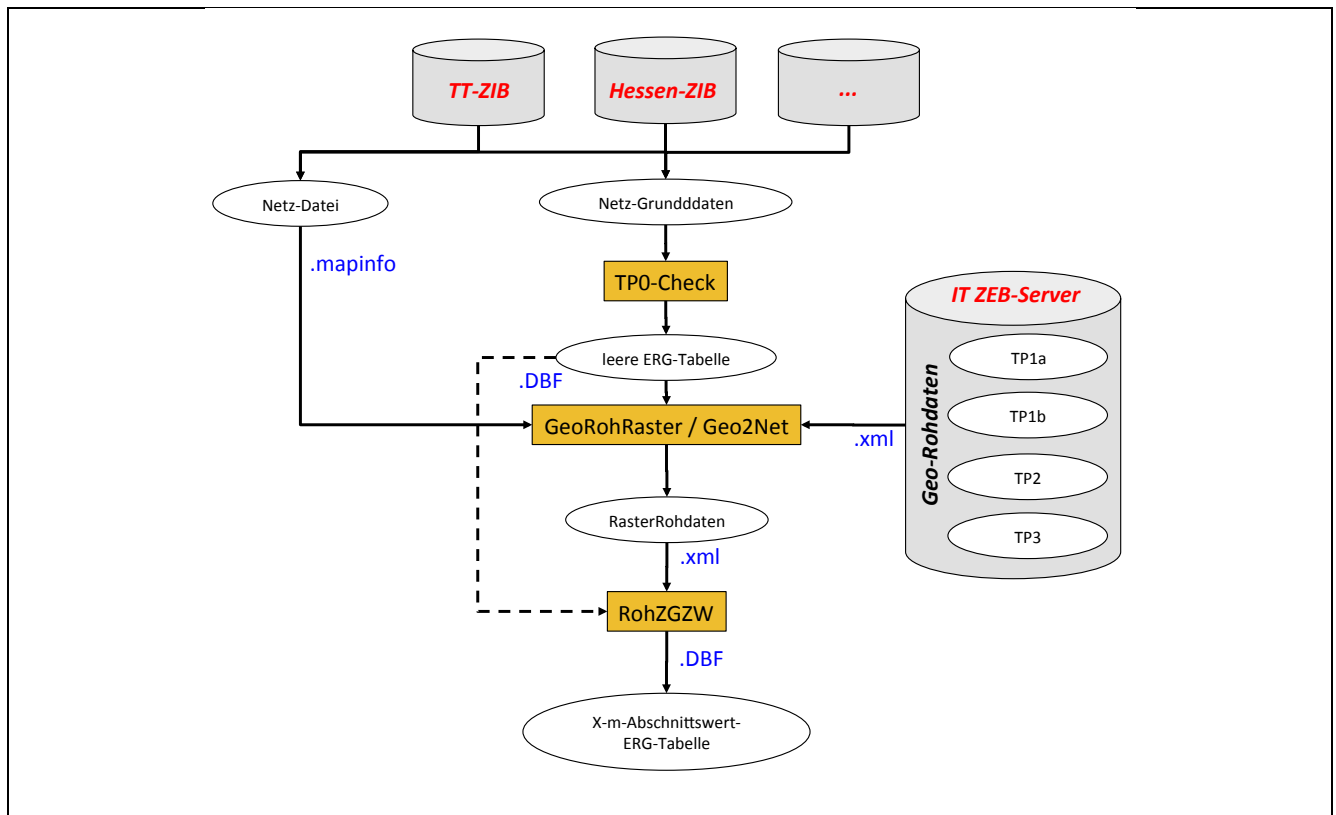


Abbildung A1: Ablaufdiagramm zur Erzeugung von nutzerspezifischen ERG-Tabellen

---

### A3 Simulation zur Parametrisierung des Kalman-Filters

Nachfolgend ist das Skript dargestellt, um die Prozessfunktion des in Kapitel 5 verwendeten Kalman-Filters zu parametrisieren.

```
#!/usr/bin/python
```

```
"""
```

```
-----  
| Optimize_Filter_Kennfeld_v08 Stand: 2019-05-11 06:48 Blumenfeld |  
-----
```

Es wird je Auswerteabschnitt zunächst ein idealisierter Zustandsverlauf angenommen. Anhand einer Simulation werden zufällige Messergebnisse zu mehreren Zeitpunkten dargestellt. Schließlich wird geprüft mit welchen Parametern die beste Annäherung an den idealisierten Zustandsverlauf erfolgen kann.

Die Ergebnisse je Kombinationsmöglichkeit der beiden Parameter werden in einem Kennfeld grafisch dargestellt.

```
"""
```

```
# Importieren der notwendigen Bibliotheken:
```

```
import csv  
import datetime  
import numpy as np  
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
from datetime import datetime  
from dateutil.parser import parse  
import pandas as pd  
import random  
import math  
import seaborn as sns  
from matplotlib.colors import ListedColormap
```

```
from sys import stdin, stdout, stderr, argv, exit  
from re import *  
from os.path import *  
from operator import itemgetter  
from math import sqrt  
from scipy import stats, integrate  
from random import gauss
```

```
# Einlesen der ERG-Datei :
```

```
csv = np.genfromtxt ('2018-09-25_ERG_DMS_ges_Zeitreihen_R_ungefiltert.csv', delimiter=",")
```

```
# Anzahl an ausgewerteten Abschnitten:
```

```
n_abschnitte = len(csv)
```

```
# Anlegen einer Variablen:
```

```
delta_ges = 0
```

```
streuung_mittel_ges = 0
```

```
Ergebnis = []
```

```
gueltig = 0
```

```
n_abschnitte = 0
```

```
# Präzision des Messverfahrens (measurement variance):
```

---

```

Std = 0.5
R = Std**2

# Liste für geschätzten Erwartungswert der Zustandsänderung:
delta_mu_list = np.linspace(0.0, 0.2, 11)

# Liste für geschätzte Varianz der Zustandsänderung:
Q_list = np.linspace(0.0, 0.2, 11)

w, h = len(delta_mu_list), len(Q_list)

# Erstellen einer mit 0 gefüllten Matrix mit der vorgegebenen Groesse:
Ergebnismatrix = [[0 for x in range(w)] for y in range(h)]

#####
# Kalman Filter über alle Auswerteabschnitte:

i = 0
for x in delta_mu_list:
    delta_mu_1 = delta_mu_list[i]
    delta_sum = 0
    j = 0
    for y in Q_list:
        Q = Q_list[j]
        delta_sum = 0
        for zeile in csv:
            # Einlesen der x-Werte der Zeitreihe:
            x_alt = zeile[24:39]
            # Einlesen der y-Werte der Zeitreihe:
            z_alt = zeile[39:54]

            # Daten aufbereiten:
            # Um nan-Werte bereinigte Zeitreihe:
            x = []
            z = []
            # Abfrage, ob als Startwert (t=0) Wert vorhanden:
            if math.isnan(x_alt[0]):
                pass
            # Wenn ja, dann setze Startwert auf 1.3 mm (Mittelwert) mit zuf. Abwei-
chung von 0.5 mm:
            else:
                z_alt[0] = abs(1.3 + random.normalvariate(0, 0.1))

            # Hier wird geprüft, ob in der Zeitreihe nan-Werte enthalten sind:
            v = 0
            for item in z_alt:
                if math.isnan(x_alt[v]):
                    pass
                elif math.isnan(z_alt[v]):
                    pass
                else:
                    x.append(x_alt[v])
                    z.append(z_alt[v])

                v = v + 1

            # Runden d. Werte innerhalb der Liste auf 1 Kommastelle:
            x = list(np.around(np.array(x),1))

```

---

```

x = [ '%.1f' % elem for elem in x ]

z = list(np.around(np.array(z),1))
z = [ '%.1f' % elem for elem in z ]

# Umwandeln der Werte in Floats:
for index, item in enumerate(x):
    x[index] = float(item)
for index, item in enumerate(z):
    z[index] = float(item)

# Abfrage, ob Zeitreihe Werte enthält:
if not z:
    x = []
    xhat = []
    pass
else:
    if min(z) >= 0:

        # Summe der Abweichungen zwischen Schätzung und wahrer
Zustandsentwicklung auf 0 setzen:
        delta_ges = 0
        delta_sum = 0

        for index, item in enumerate(z):

            # Prüft ob Flags (ungültige Werte) in der Zeitreihe
enthalten sind:
            if item >= 0:

### Wahre Zustandsentwicklung auf Basis der empirischen Messwerte:

# Festlegung von zufälligen Ausprägungen der Funktionsparameter a und b:
        a1 =random.normalvariate(2.0, 0.5)
        b1 =random.normalvariate(0.6, 0.1)

# Erzeugen von X-Werten für die Funktion:
        x_wahr = np.linspace(0,math.ceil(max(x)),math.ceil(max(x))+1)

# Zufällig gewählter Y-Achsenabschnitt:
        y_random = random.normalvariate(1.2, 0.3)

# Anpassung des Koeffizienten a:
        a_neu = (z[-1]-(y_random))/(x[-1]**b1)

# Erzeugen von Y-Werten für die Funktion:
        y_wahr = a_neu*(np.asarray(x)**b1) + y_random

### Berechnung von zufälligen Messergebnissen entlang der wahren Zustandsentwicklung:

# Ergänzen eines zufälligen Störterms:
        variable2 = 0
        for value in z:
            z[value2] = y_wahr[value2] + random.normalvariate(0, Std)
            variable2 = variable2 + 1

# Erstellung einer gesamten Liste für das Zeichnen der wahren Zustandsentwicklung:
        y_wahr = a_neu*(x_wahr**b1) + y_random

```

```
#####

# Anzahl der Messungen in der Zeitreihe:
n_iter = len(z)

# Erstellen eines Arrays mit der Größe:
sz = (n_iter,)

# Erzeugen leerer Arrays:
xhat=np.zeros(sz) # a posteri estimate of x
P=np.zeros(sz) # a posteri error estimate
xhatminus=np.zeros(sz)#a priori estimate of x
Pminus=np.zeros(sz) # a priori error estimate
K=np.zeros(sz) # gain or blending factor

# Ausgangszustand für a priori Funktion (entspricht der ersten Schätzung):
xhatminus[0] = abs(1.5 + random.normalvariate(0, 0.2))

# Ausgangszustand für geschätzten Zustandsverlauf:
xhat[0] = xhatminus[0]

# geschätzte Varianz zu Beginn der Messreihe:
P[0] = R

# geschätzte Zustandsänderungen zwischen den MZP anhand der zeitlichen Abstände:
zeitabstand = np.diff(x)
delta_mu = [i * delta_mu_1 for i in zeitabstand]

# Ergänzen der ersten Differenz = 0 in der Liste, für Startwert:
delta_mu.insert(0, 0)

# geschätzte Varianz der Zustandsänderung pro 1 Jahr:
Q_1 = Q_list[j]

# geschätzte Varianz der Zustandsänderung zwischen den MZP anhand der zeitlichen Abstände:
Q = [i * Q_1 for i in zeitabstand]

# Schleife für "Measurement-Prediction"-Berechnungen:
for k in range(1,n_iter):

## Prediction update:

# Berechnung des nächsten geschätzten Zustandes anhand des vorherig prognostizierten Zu-
standes und der a priori Zustandsänderung:
xhatminus[k] = xhat[k-1] + delta_mu[k-1]

# Addieren der Varianzen:
Pminus[k] = P[k-1] + Q[k-1]

## Measurement update:

# Berechnung des Kalman-Gains (Faktor) mittels der Varianzen aus Messverfahren (R) und
Varianz des vorherigen Wertes (Pminus):
K[k] = Pminus[k]/(Pminus[k] + R)

# Berechnung des neuen geschätzten Wertes aus vorherigem prognostiziertem Wert (xhatmi-
nus[k]) und dem mitem Kalman-Gain (K[k]) gewichteten aktuellem Messergebnis (z[k]):
xhat[k] = xhatminus[k]+K[k]*(z[k]-xhatminus[k])

# Berechnung der neuen Varianz P[k] des aktuellen geschätzten Messwertes z[k]:
```



$$P[k] = (1-K[k])*P_{\text{minus}}[k]$$

```
# Interpoliere jeweils die Jahreswerte je Zeitreihe:
x_interpolate = np.arange((np.round(min(x),0)), (np.round(max(x),0)+1), 1)
y_interpolate = np.zeros(len(x_interpolate))

variable = 0
for item in x_interpolate:
    y_interpolate[variable] = np.interp(x_interpolate[variable], x, xhat)

    variable = variable + 1

n_min = min(len(y_wahr), len(y_interpolate))

# Berechnung der quadrierten Abweichungen zwischen gemessenem Zustand und gefiltertem Zustand:
variable1 = 0
for P in y_wahr[0:n_min]:
    delta = (y_wahr[0:n_min][variable1] - y_interpolate[0:n_min][variable1])**2

    delta_ges = delta_ges + delta

    variable1 = variable1 + 1

delta_ges=np.round((delta_ges/n_min)**0.5,3)

# Gefilterte Zeitreihe als Liste:
xhat = np.array(xhat).tolist()

# Runden aller Werte innerhalb der Liste auf 1 Kommastelle:
xhat = list(np.around(np.array(xhat),1))
xhat = [ '%.1f' % elem for elem in xhat ]
gueltig = gueltig + 1
delta_sum = delta_sum + delta_ges

else:
    pass

Ergebnismatrix[i][j] = delta_sum/n_Abschnitte

j = j + 1
delta_sum = 0

i = i + 1
delta_sum = 0

# Markierungen an den X- und Y-Achsen:
yticks = delta_mu_list
xticks = Q_list

# Rotation der Ticks:
plt.yticks(rotation=1)
plt.yticks(rotation=1)

# -----
```

---

# Anpassen der Grafik:

```
plt.figure(1).canvas.set_window_title('Optimierungskennfeld')
```

```
#ax = sns.heatmap(Ergebnismatrix, cmap=ListedColormap(['green', 'greenyellow', 'yellow',  
'orange', 'red']), xticklabels=xticks, yticklabels=yticks, linewidth=0.01, linecol-  
or='white')
```

```
ax = sns.heatmap(Ergebnismatrix, cmap="gnuplot2", xticklabels=xticks, yticklabels=yticks,  
linewidth=0.01, linecolor='black')
```

```
# x axis on top:  
ax.xaxis.tick_top()  
ax.xaxis.set_label_position('top')
```

```
# Beschriftung der Achsen:  
plt.xlabel("Varianz der Zustandsänderung pro Jahr [ $\text{mm}^2$ ]", fontsize=10,  
fontweight="bold")
```

```
plt.ylabel("Erwartungswert der Zustandsänderung pro Jahr [mm]", fontsize=10, font-  
weight="bold")
```

```
# Grafik speichern:  
# plt.savefig("test")
```

```
# Grafik anzeigen:  
#plt.tight_layout(0.4)
```

```
plt.show()
```

## A4 Ergebnisse der Strukturgleichungsmodellierung

Im Nachfolgenden sind die Ergebnisse der in R Studio (Version 1.0.153) durchgeführten Strukturgleichungsmodellvarianten dargestellt.

### Modellvariante 1

```
> # Ausgabe der Zusammenfassung für Modell 1 (linear Asphalt):
```

```
> summary(ergebnis_1, standardized=TRUE, fit.measures=TRUE, rsquare=TRUE)
lavaan 0.6-5 ended normally after 33 iterations
```

Estimator	ML
Optimization method	NLMINB
Number of free parameters	9
Number of observations	2860
Number of missing patterns	5

Model Test User Model:

	Standard	Robust
Test Statistic	552.689	285.229
Degrees of freedom	11	11
P-value (Chi-square)	0.000	0.000
Scaling correction factor for the Yuan-Bentler correction (Mplus variant)		1.938

Model Test Baseline Model:

Test statistic	9697.634	3553.295
Degrees of freedom	10	10
P-value	0.000	0.000
Scaling correction factor		2.729

User Model versus Baseline Model:

Comparative Fit Index (CFI)	0.944	0.923
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.949	0.930
Robust Comparative Fit Index (CFI)		0.945
Robust Tucker-Lewis Index (TLI)		0.950

Loglikelihood and Information Criteria:

Loglikelihood user model (H0)	-10915.318	-10915.318
Scaling correction factor for the MLR correction		2.836
Loglikelihood unrestricted model (H1)	-10638.974	-10638.974
Scaling correction factor for the MLR correction		2.342
Akaike (AIC)	21848.637	21848.637
Bayesian (BIC)	21902.264	21902.264
Sample-size adjusted Bayesian (BIC)	21873.668	21873.668

Root Mean Square Error of Approximation:

RMSEA	0.131	0.093
-------	-------	-------

90 Percent confidence interval - lower	0.122	0.087
90 Percent confidence interval - upper	0.141	0.100
P-value RMSEA <= 0.05	0.000	0.000

Robust RMSEA	0.130
90 Percent confidence interval - lower	0.117
90 Percent confidence interval - upper	0.143

Standardized Root Mean Square Residual:

SRMR	0.091	0.091
------	-------	-------

Parameter Estimates:

Information	Observed
Observed information based on	Hessian
Standard errors	Robust.huber.white

Latent Variables:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z )	Std.lv	Std.all
intercept =~						
y0	1.000				0.504	0.758
y5	1.000				0.504	0.497
y10	1.000				0.504	0.283
y15	1.000				0.504	0.196
y20	1.000				0.504	0.145
slope =~						
y0	0.000				0.000	0.000
y5	1.000				0.861	0.849
y10	2.000				1.723	0.968
y15	3.000				2.584	1.007
y20	4.000				3.446	0.988

Covariances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z )	Std.lv	Std.all
intercept ~~						
slope	-0.057	0.018	-3.192	0.001	-0.131	-0.131

Intercepts:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z )	Std.lv	Std.all
.y0	0.000				0.000	0.000
.y5	0.000				0.000	0.000
.y10	0.000				0.000	0.000
.y15	0.000				0.000	0.000
.y20	0.000				0.000	0.000
intercept	1.708	0.013	131.760	0.000	3.389	3.389
slope	1.140	0.019	59.042	0.000	1.323	1.323

Variances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z )	Std.lv	Std.all
.y15	0.000				0.000	0.000
.y0	0.188	0.018	10.274	0.000	0.188	0.425
.y5	0.147	0.014	10.163	0.000	0.147	0.143
.y10	0.176	0.018	9.774	0.000	0.176	0.056
.y20	0.495	0.042	11.857	0.000	0.495	0.041
intercept	0.254	0.018	14.496	0.000	1.000	1.000
slope	0.742	0.039	19.114	0.000	1.000	1.000

R-Square:

Estimate

---

y15	1.000
y0	0.575
y5	0.857
y10	0.944
y20	0.959

```
>
> # Fitwerte berechnen:
> lavInspect(ergebnis_1, "sampstat")
$cov
      y0      y5      y10      y15      y20
y0  0.418
y5  0.146  1.136
y10 0.019  1.638  2.921
y15 -0.094  2.155  3.973  5.860
y20 -0.191  2.807  5.111  7.708 10.680

$mean
      y0      y5      y10      y15      y20
1.680  2.888  3.903  4.955  5.956
```

## Modellvariante 2

```
> # Ausgabe der Zusammenfassung für Modell 2 (quadratisch Asphalt):
```

```
> summary(ergebnis_2, standardized=TRUE, fit.measures=TRUE, rsquare=TRUE)
lavaan 0.6-5 ended normally after 50 iterations
```

Estimator	ML
Optimization method	NLMINB
Number of free parameters	13
Number of observations	2860
Number of missing patterns	5

### Model Test User Model:

	Standard	Robust
Test Statistic	117.757	72.560
Degrees of freedom	7	7
P-value (Chi-square)	0.000	0.000
Scaling correction factor for the Yuan-Bentler correction (Mplus variant)		1.623

### Model Test Baseline Model:

Test statistic	9697.634	3553.295
Degrees of freedom	10	10
P-value	0.000	0.000
Scaling correction factor		2.729

### User Model versus Baseline Model:

Comparative Fit Index (CFI)	0.989	0.981
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.984	0.974
Robust Comparative Fit Index (CFI)		0.989
Robust Tucker-Lewis Index (TLI)		0.984

### Loglikelihood and Information Criteria:

Loglikelihood user model (H0)	-10697.852	-10697.852
Scaling correction factor for the MLR correction		2.729
Loglikelihood unrestricted model (H1)	-10638.974	-10638.974
Scaling correction factor for the MLR correction		2.342
Akaike (AIC)	21421.704	21421.704
Bayesian (BIC)	21499.166	21499.166
Sample-size adjusted Bayesian (BIC)	21457.860	21457.860

### Root Mean Square Error of Approximation:

RMSEA	0.074	0.057
90 Percent confidence interval - lower	0.063	0.048
90 Percent confidence interval - upper	0.086	0.067
P-value RMSEA <= 0.05	0.000	0.094
Robust RMSEA		0.073
90 Percent confidence interval - lower		0.058

90 Percent confidence interval – upper

0.089

Standardized Root Mean Square Residual:

SRMR

0.042

0.042

Parameter Estimates:

Information  
Observed information based on  
Standard errors

Observed  
Hessian  
Robust.huber.white

Latent Variables:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z )	Std.lv	Std.all
intercept =~						
y0	1.000				0.566	0.874
y5	1.000				0.566	0.540
y10	1.000				0.566	0.327
y15	1.000				0.566	0.233
y20	1.000				0.566	0.181
slope =~						
y0	0.000				0.000	0.000
y5	1.000				1.105	1.055
y10	2.000				2.210	1.277
y15	3.000				3.314	1.367
y20	4.000				4.419	1.411
q =~						
y0	0.000				0.000	0.000
y5	1.000				0.183	0.175
y10	4.000				0.732	0.423
y15	9.000				1.647	0.679
y20	16.000				2.928	0.935

Covariances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z )	Std.lv	Std.all
intercept ~~						
slope	-0.183	0.032	-5.719	0.000	-0.293	-0.293
q	0.021	0.006	3.634	0.000	0.207	0.207
slope ~~						
q	-0.139	0.016	-8.847	0.000	-0.689	-0.689

Intercepts:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z )	Std.lv	Std.all
.y0	0.000				0.000	0.000
.y5	0.000				0.000	0.000
.y10	0.000				0.000	0.000
.y15	0.000				0.000	0.000
.y20	0.000				0.000	0.000
intercept	1.685	0.012	137.025	0.000	2.979	2.979
slope	1.226	0.026	47.865	0.000	1.109	1.109
q	-0.049	0.006	-7.755	0.000	-0.267	-0.267

Variances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z )	Std.lv	Std.all
.y20	0.000				0.000	0.000
.y0	0.099	0.024	4.180	0.000	0.099	0.236
.y5	0.124	0.014	8.855	0.000	0.124	0.113
.y10	0.045	0.012	3.839	0.000	0.045	0.015
.y15	0.097	0.012	7.907	0.000	0.097	0.017
intercept	0.320	0.028	11.263	0.000	1.000	1.000

slope	1.221	0.077	15.855	0.000	1.000	1.000
q	0.033	0.004	8.146	0.000	1.000	1.000

R-Square:

	Estimate
y20	1.000
y0	0.764
y5	0.887
y10	0.985
y15	0.983

```
>
> # Fitwerte berechnen:
> lavInspect(ergebnis_2, "sampstat")
$cov
  y0    y5   y10   y15   y20
y0  0.418
y5  0.146  1.136
y10 0.019  1.638  2.921
y15 -0.094  2.155  3.973  5.860
y20 -0.191  2.807  5.111  7.708 10.680

$mean
  y0    y5   y10   y15   y20
1.680 2.888 3.903 4.955 5.956
```



### Modellvariante 3

```
> # Ausgabe der Zusammenfassung Modell 3 (quadratisch Asphalt+ belastung15):
```

```
> summary(ergebnis_3, standardized=TRUE, fit.measures=TRUE, rsquare=TRUE)
lavaan 0.6-5 ended normally after 62 iterations
```

Estimator	ML	
Optimization method	NLMINB	
Number of free parameters	16	
	Used	Total
Number of observations	2840	2860
Number of missing patterns	5	

#### Model Test User Model:

	Standard	Robust
Test Statistic	118.366	84.605
Degrees of freedom	9	9
P-value (Chi-square)	0.000	0.000
Scaling correction factor		1.399
for the Yuan-Bentler correction (Mplus variant)		

#### Model Test Baseline Model:

Test statistic	10282.647	4834.432
Degrees of freedom	15	15
P-value	0.000	0.000
Scaling correction factor		2.127

#### User Model versus Baseline Model:

Comparative Fit Index (CFI)	0.989	0.984
Tucker-Lewis Index (TLI)	0.982	0.974
Robust Comparative Fit Index (CFI)		0.990
Robust Tucker-Lewis Index (TLI)		0.983

#### Loglikelihood and Information Criteria:

Loglikelihood user model (H0)	-10184.594	-10184.594
Scaling correction factor		2.429
for the MLR correction		
Loglikelihood unrestricted model (H1)	-10125.411	-10125.411
Scaling correction factor		2.058
for the MLR correction		
Akaike (AIC)	20401.188	20401.188
Bayesian (BIC)	20496.413	20496.413
Sample-size adjusted Bayesian (BIC)	20445.575	20445.575

#### Root Mean Square Error of Approximation:

RMSEA	0.065	0.054
90 Percent confidence interval - lower	0.055	0.046
90 Percent confidence interval - upper	0.076	0.064
P-value RMSEA <= 0.05	0.007	0.197
Robust RMSEA		0.064

90 Percent confidence interval - lower	0.052
90 Percent confidence interval - upper	0.077

Standardized Root Mean Square Residual:

SRMR	0.025	0.025
------	-------	-------

Parameter Estimates:

Information	Observed
Observed information based on	Hessian
Standard errors	Robust.huber.white

Latent Variables:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z )	Std.lv	Std.all
intercept =~						
y0	1.000				0.560	0.865
y5	1.000				0.560	0.534
y10	1.000				0.560	0.327
y15	1.000				0.560	0.235
y20	1.000				0.560	0.184
slope =~						
y0	0.000				0.000	0.000
y5	1.000				1.109	1.057
y10	2.000				2.218	1.295
y15	3.000				3.328	1.398
y20	4.000				4.437	1.456
q =~						
y0	0.000				0.000	0.000
y5	1.000				0.186	0.177
y10	4.000				0.742	0.433
y15	9.000				1.670	0.702
y20	16.000				2.969	0.975

Regressions:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z )	Std.lv	Std.all
intercept ~						
belastung15_sv	0.002	0.003	0.726	0.468	0.004	0.016
slope ~						
belastung15_sv	0.089	0.006	16.047	0.000	0.080	0.327
q ~						
belastung15_sv	0.005	0.001	4.294	0.000	0.027	0.110

Covariances:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z )	Std.lv	Std.all
.intercept ~~						
.slope	-0.182	0.029	-6.208	0.000	-0.310	-0.310
.q	0.022	0.006	3.720	0.000	0.209	0.209
.slope ~~						
.q	-0.154	0.014	-10.697	0.000	-0.798	-0.798

Intercepts:

	Estimate	Std.Err	z-value	P(> z )	Std.lv	Std.all
.y0	0.000				0.000	0.000
.y5	0.000				0.000	0.000
.y10	0.000				0.000	0.000
.y15	0.000				0.000	0.000
.y20	0.000				0.000	0.000
.intercept	1.674	0.018	93.892	0.000	2.988	2.988
.slope	0.792	0.031	25.421	0.000	0.714	0.714

---

```

.q                -0.078    0.007 -11.200    0.000    -0.420    -0.420

Variances:
      Estimate Std.Err z-value P(>|z|) Std.lv Std.all
.y20      0.000
.y0       0.106    0.024   4.501   0.000    0.106    0.252
.y5       0.131    0.014   9.100   0.000    0.131    0.119
.y10      0.042    0.012   3.621   0.000    0.042    0.014
.y15      0.099    0.012   8.160   0.000    0.099    0.017
.intercept 0.314    0.028  11.370   0.000    1.000    1.000
.slope    1.099    0.070  15.775   0.000    0.893    0.893
.q        0.034    0.004   9.707   0.000    0.988    0.988

R-Square:
      Estimate
y20      1.000
y0       0.748
y5       0.881
y10      0.986
y15      0.983
intercept 0.000
slope    0.107
q        0.012

>
> # Fitwerte berechnen:
> lavInspect(ergebnis_3, "sampstat")
$cov
      y0      y5      y10      y15      y20      bls15_
y0      0.419
y5      0.151  1.138
y10     0.030  1.627  2.882
y15    -0.071  2.115  3.879  5.656
y20    -0.119  2.588  4.790  7.188  9.708
belastung15_sv 0.001  1.715  3.276  5.051  7.405 16.654

$mean
      y0      y5      y10      y15      y20 belastung15_sv
1.680    2.909    3.934    4.991    5.916    5.100

```

## A5 Ergebnisse des Wilcoxon-Mann-Whitney-Tests

Tabelle 40: Ergebnisse des Wilcoxon-Mann-Whitney-Tests (U-Test)

MZP	Entwicklungsdaten			Validierungsdaten			U-Test
	<i>N</i>	<i>Mean Rank</i>	<i>Sum of Ranks</i>	<i>N</i>	<i>Mean Rank</i>	<i>Sum of Ranks</i>	
y0	2.869	1.794,92	5.149.615,50	723	1.802,78	1.303.412,50	$z = -0,183$ ; $p = 0,855$
y1	2.765	1.741,80	4.816.067,00	705	1.710,81	1.206.118,00	$z = -0,735$ ; $p = 0,463$
y2	2.763	1.743,93	4.818.470,50	705	1.697,55	1.196.775,50	$z = -1,099$ ; $p = 0,272$
y3	2.754	1.738,07	4.786.643,50	702	1.690,96	1.187.052,50	$z = -1,118$ ; $p = 0,264$
y4	2.730	1.722,14	4.701.453,00	696	1.679,59	1.168.998,00	$z = -1,014$ ; $p = 0,311$
y5	2.534	1.600,68	4.056.128,50	647	1.553,08	1.004.842,50	$z = -1,178$ ; $p = 0,239$
y6	2.534	1.600,44	4.055.505,00	647	1.554,04	1.005.466,00	$z = -1,148$ ; $p = 0,251$
y7	2.534	1.601,88	4.059.159,50	647	1.548,39	1.001.811,50	$z = -1,323$ ; $p = 0,186$
y8	2.268	1.425,25	3.232.469,00	569	1.394,08	793.234,00	$z = -0,812$ ; $p = 0,417$
y9	2.209	1.389,49	3.069.392,50	552	1.347,01	743.548,50	$z = -1,120$ ; $p = 0,263$
y10	1.934	1.212,50	2.344.968,50	476	1.177,07	560.286,50	$z = -0,995$ ; $p = 0,320$
y11	1.854	1.163,01	2.156.220,00	457	1.127,56	515.296,00	$z = -1,018$ ; $p = 0,309$
y12	1.823	1.146,56	2.090.178,00	454	1.108,65	503.325,00	$z = -1,100$ ; $p = 0,271$
y13	1.601	1.005,46	1.609.738,50	393	965,08	379.276,50	$z = -1,246$ ; $p = 0,213$
y14	1.249	782,15	976.901,50	296	734,40	217.383,50	$z = -1,656$ ; $p = 0,098$
y15	1.048	654,37	685.784,50	250	629,07	157.266,50	$z = -0,959$ ; $p = 0,337$
y16	1.040	649,66	675.650,50	249	625,52	155.754,50	$z = -0,920$ ; $p = 0,358$
y17	1.010	628,89	635.176,50	239	608,57	145.448,50	$z = -0,783$ ; $p = 0,433$
y18	1.009	627,60	633.252,50	239	611,40	146.123,50	$z = -0,625$ ; $p = 0,532$
y19	898	559,62	502.541,00	211	535,33	112.954,00	$z = -0,992$ ; $p = 0,321$
y20	781	488,00	381.128,00	189	475,17	89.807,00	$z = -0,565$ ; $p = 0,572$